

YMPÄRISTÖN-
SUOJELU

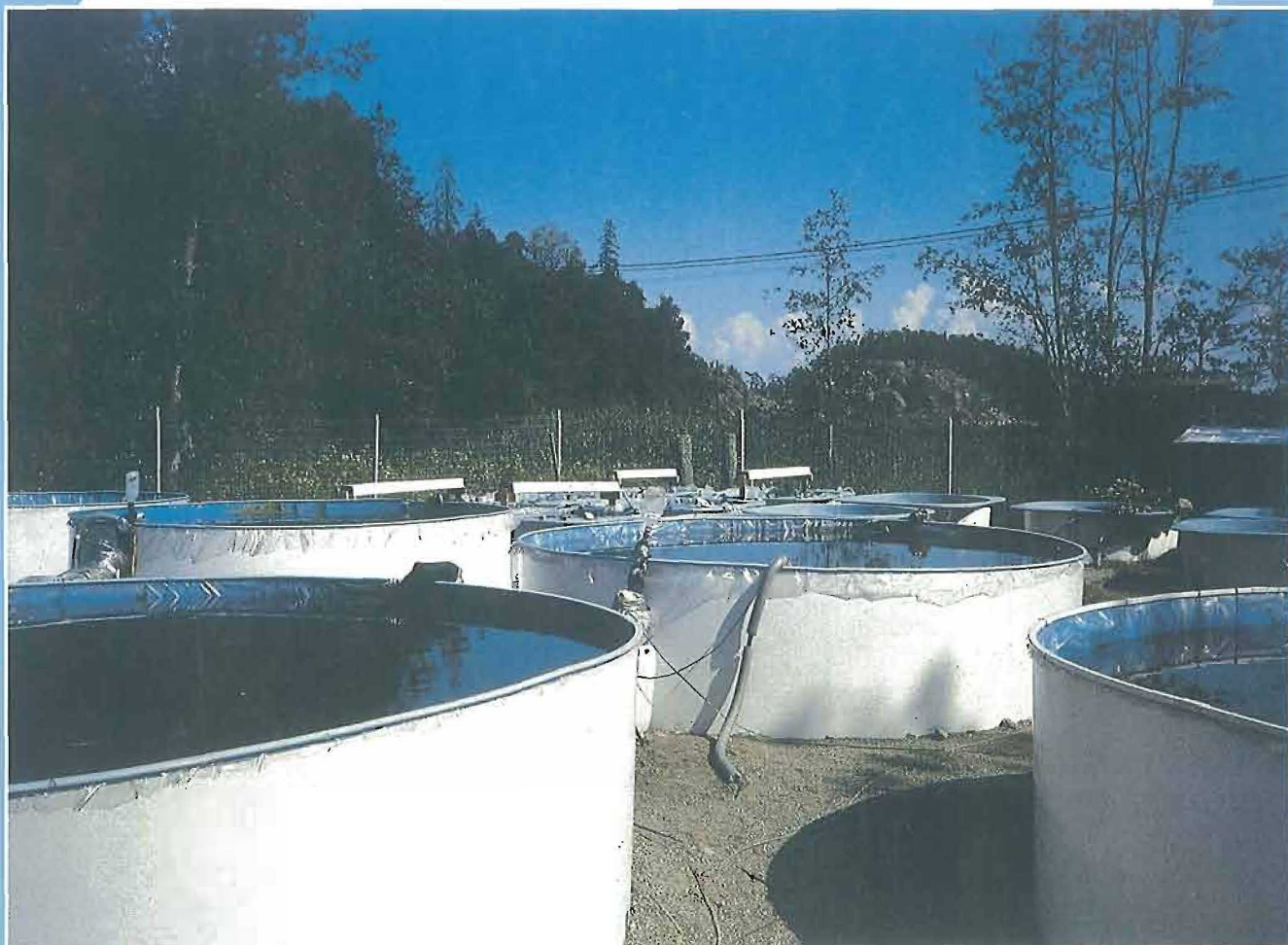
Karl-Johan Lehtinen, Jukka Tana, Kaj Mattsson, Christina Engström, Tarja Nakari, Jukka Ahtiainen ja Marit Lagus

Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia

Vaihe II. Malliekosysteemit

Osa I: Vaikutukset ekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen

Osa II: Vaikutukset kalojen fysiologiaan – kirjolohialtistus



Karl-Johan Lehtinen, Jukka Tana,
Kaj Mattsson, Christina Engström, Tarja Nakari,
Jukka Ahtiainen ja Marit Lagus

Happikemikaalien käyttöön perustuvan massavalkaisun ympäristövaikutuksia

Vaihe II. Malliekosysteemikokeet

Osa I: Vaikutukset ekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen

Osa II: Vaikutukset kalojen fysiologiaan – kirjolohialtistus

HELSINKI 1998



ISBN 952-11-0262-4
ISSN 1238-7312

Kansikuva: Malliekosysteemialtaat
Kuva: Jukka Ahtiainen
Sivutaitto: DTPage Oy
Paino: Oy Edita Ab
Helsinki 1998

Alkusanat

Happikemikaalien käyttöön perustuva sellun delignifointi on yleistynyt Suomessa nopeasti 1990-luvun alusta lähtien. Massa valkaistaan nykyisin sekvensseillä, joissa ei käytetä alkuaineklooria valkaisukemikaalina (ECF-massa, Elementary Chlorine Free) tai, joissa ei käytetä kloorikemikaaleja lainkaan (TCF-massa, Totally Chlorine Free).

Näiden kahden massatyypin tuotannosta aiheutuvien jätevesien aiheuttamia ympäristövaikutuksia on tutkittu tutkimusprojektissa "Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia". Sen I vaihe aloitettiin keväällä 1993 ja saatiin päätökseen vuonna 1994. Kaksivuotisen tutkimusprojektin tavoitteena oli saada käsitys otsonin ja peroksidin käyttöön perustuvan valkaisun jätevesien ominaisuuksista ja ympäristövaikutuksista mahdollisimman moni-puolisesti suhteellisen nopealla aikataululla ja niin, että tehdyt selvitykset olisivat kaikkien osapuolten teollisuuden, viranomaisten sekä tutkimus- ja kehitystahojen hyödynnettävissä. Tutkimusprojektin I vaiheen tulokset on julkaistu vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisusarjassa A No. 189 (Verta, toim. 1994). Vaiheessa I tehtiin valituille lehtipuumassan jätevesille kemiallinen ja biologinen karakterisointi, tutkittiin malliekosysteemeillä ECF- ja TCF-lehtipuumassan tuotannosta aiheutuvien valkaisu-jätevesien vaikutuksia sekä tutkittiin kompleksin-muodostajien esiintymistä malliekosysteemeissä ja luonnonvesissä.

Tutkimusprojektin vaihe II käynnistyi projektin yhteysryhmän päätöksellä syksyllä 1994. Vaihe II aloitettiin tekemällä laaja kirjallisuuskatsaus sellutehtaiden jätevesien ympäristövaikutuksista (Tana & Lehtinen 1996). Vaiheen I tulosten ja tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella katsottiin aiheelliseksi jatkaa mallieko-systeemitutkimuksia ECF- ja TCF-havupuumassojen tuotannosta aiheutuvien jätevesien vaikutuksista. Lisäksi haluttiin saada vertailukohde vaiheen I lehtipuumassan ja vaiheen II havupuumassan vaikutuksia kuvaaville tuloksille niiden merkityksen arvioimista varten. Tämän vuoksi vaiheeseen II päätettiin sisällyttää tutkimus aktiivilietelaitoksessa käsitellyn yhdyskuntajäteveden sekä luonnontilaisesta suosta peräisin olevan veden vaikutuksista malliekosysteemeissä.

Vaiheen II tavoitteena on ollut täydentää vaiheessa I saatuja tietoja lehti-puumassan osalta sekä toisaalta tarkastella myös talviajan aiheuttamia vaikutuksia.

Tämä raportti jakautuu kahteen osaan. Raportin I osassa käsitellään jätevesien vaikutusta malliekosysteemien rakenteeseen ja toimintaan. Mukaan on myös omina kohtinaan sisällytetty tutkituilla jätevesillä tehtyjen toksisuustestien tulokset sekä malliekosysteemialtaissa tehdyt mikrobiologiset selvitykset. Raportin II osa sisältää malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehtyjen kala-altistusten tulokset. Tällä tavoin on pyritty saamaan kokonaisuus koko projektin tutkimuksista kuitenkin niin, että kumpaaakin osaa voidaan myös käsitellä omana kokonaisuutena. Tutkittujen jätevesien kemiallinen karakterisointi on raportoitu erikseen (Mikkelsen & Paasivirta 1996).

Osa I

Vaikutukset ekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen

Karl-Johan Lehtinen, Jukka Tana,
Kaj Mattsson, Christina Engström, Marit Lagus,
Jukka Ahtiainen * ja Tarja Nakari *

Suomen Ympäristötutkijaryhmä- MFG
Tekniikantie 12, FIN-02150 ESPOO

* Suomen ympäristökeskus
PL 140, FIN-00251 HELSINKI

Sisällys

- 1 Johdanto 9**
- 2 Aineisto ja menetelmät..... 11**
 - 2.1 Tutkitut jätevedet 11
 - 2.2 Jätevesien myrkyllisyys 14
 - 2.3 Malliekosysteemin koejärjestelyt 15
 - 2.4 Malliekosysteemin näytteenotto ja mittausmenetelmät 17
 - 2.4.1 Toiminnalliset muuttujat 17
 - 2.4.2 Rakenteelliset muuttujat 18
- 3 Tulokset 19**
 - 3.1 Jätevesien myrkyllisyys 19
 - 3.2 Jätevesien aiheuttama kuormitus 20
 - 3.3 Rakenteelliset vaikutukset 21
 - 3.3.1 Vaikutukset perustuottajiin (kasvit) 21
 - 3.3.2 Vaikutukset selkärangattomiin eläimiin 27
 - 3.3.3 Vaikutukset kaloihin 31
 - 3.4 Toiminnalliset vaikutukset 34
 - 3.4.1 Perustuotanto 34
 - 3.4.2 Ravinnesuolat ja orgaaninen hiili 35
- 4 Tulosten tarkastelu 41**
 - 4.1 Jätevesikohtainen tarkastelu 43
 - 4.2 Tutkittujen jätevesien vertailu 49
 - 4.3 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin 56
- 5 Tutkimuksen yleiset johtopäätökset 60**
- Kirjallisuus 61**

Johdanto

Päästöjen pienentäminen on viimeiset parikymmentä vuotta ollut tärkein sellutuo-
tannon teknistä kehitystä määräävä yksittäinen tekijä. Tämä suuntaus on johtanut
merkittäviin prosessitekniiikan muutoksiin ja huomattaviin lisäyksiin ympäristön-
suojeleuinvestoinneissa. Liuenneen puuraaka-aineen lisääntynyt sisäinen talteenot-
to on ollut merkittävä muutos, jolla on myös taloudellisia etuja. Kloorikaasun käyt-
tö valkaisuissa on korvattu klooridioksidilla (ECF-valkaisu) ja muilla happea sisäl-
tävillä kemikaaleilla kuten peroksidilla ja otsonilla (TCF-valkaisu). Toinen merkit-
tävä tekijä päästöjen kannalta on ollut ulkoisten biologisten puhdistuslaitosten ra-
kentaminen metsäteollisuuslaitosten yhteyteen. Lisäksi useimmat tehtaat ovat vä-
hentäneet jätevesipäästöjään prosessien sisäisillä toimilla esimerkiksi satunnaispääs-
töjä pienentämällä, suunnittelemalla viemäröintiä sekä sulkemalla valkaisuimon ve-
sikiertoja.

Biologinen karakterisointi on muodostunut merkittäväksi keinoksi selvittää
ympäristövaikutusten ilmenemistä ja laajuutta vesiekosysteemeissä. Yksinkertaisim-
mat biologiset menetelmät ovat suurissa jätevesipitoisuuksissa akuuttia ja lyhytai-
kaista toksisuutta mittaavat yksilajitestit, joista käytetään yleisesti nimitystä toksi-
suustesti. Vaikka toksisuustestien ei ole voitu osoittaa ennustavan mahdollisia pie-
nemmissä, mutta haitallisissa pitoisuuksissa todettavia vaikutuksia (subletaali) yk-
silö-, populaatio- ja yhteisötasolla, voidaan prosessien ja tehtaiden jätevedet niiden
avulla asettaa järjestykseen suhteellisen toksisuuden mukaan. Toksisuutestejä on
myöhemmin täydennetty subletaaleja ja kroonisia vaikutuksia selvittävillä tutki-
muksilla, joita pääosin on tehty kaloilla sekä laboratorio- että kenttäolosuhteissa
(Owens 1991; Tana & Lehtinen 1996).

Yksilajitestien lisäksi metsäteollisuuden jätevesiä on tutkittu monilajitesteillä,
joista tärkeimpiä ovat olleet Itämeren rantavyöhykettä kuvaavat malliekosysteet-
mit. Valkaistun sulfaattimassan tuotannosta aiheutuvia jätevesien biologisia vai-
kutuksia on laajemmin selvitetty 1980-luvun alusta lähtien. Malliekosysteemit-
tekniiikan kehittelyn taustana oli se, että yksilötasolla vaikutuksia kuvaavilla yksilaji-
testeillä ei yksinään voitu ennustaa aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Todenmu-
kaisemman tiedon saamiseksi oli hankittava ekosysteemin rakennetta ja toimintaa
kuvaavaa tieteellistä aineistoa. Täten saadaan merkittävästi todellisempaa tietoa
ja käytetyt tutkimusmenetelmät mahdollistavat suorien ja epäsuorien vaikutusten
selvittämisen.

Malliekosysteemi voidaan määritellä yksinkertaistetuksi luonnollisen ekosys-
teemin kopioksi. Ekosysteemi muodostuu fyysisestä ympäristöstä, johon kuuluvat
vesi, pohja, veteen liuenneet aineet sekä mikro-organismit, kasvit ja eläimet. Aurin-
ko-energian, hiilidioksidin, veden ja kivennäissuolojen avulla muodostuu kasviai-
nesta, joka toimii ravintona alimmalle kuluttajatasolle (primäärikuluttajat). Pedot
eli toisen asteen kuluttajat muodostavat sekä määrällisesti että ekosysteemin läpi
virtaavan energian kannalta vain pienen osan systeemiä, mutta niiden merkitys
primäärikuluttajien säätelyssä on merkittävä. Kuolleen orgaanisen aineksen l. det-
rituksen syöjät (mikro-organismit ja tietyt eläimet) toimivat lopullisina hajottajina,
jolloin kivennäissuolat vapautuvat käytettäväksi uudelleen kasvien rakennusaineena.

Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia selvittävän projektin I vaiheessa tutkittiin lehtipuumassan tuotannosta aiheutuvia valkaisun jätevesiä. Tutkimuksissa todettiin kaikki puhdistamattomat valkaisu-jätevedet toksisiksi yleensä vielä alle 30 % laimennoksina. Konventionaalisen valkaisun ja ECF- tai TCF-valkaisun jätevedet eivät toksisuudeltaan olennaisesti poikenneet toisistaan. Biologinen puhdistus sekä pilot-laitteistolla että laitosmittakaavaisesti poisti tehokkaasti toksisuuden, ja jätevesien toksisuuden parhaaksi selittäjäksi osoittautui jätevedessä oleva puuperäisen orgaanisen aineen määrä (Verta ym. 1994).

Malliekosysteemikokeet osoittivat ECF- ja TCF-jätevesien aiheuttamien vaikutusten väliset erot pieniksi. Malliekosysteemeistä saatu kokonaiskuva osoitti, että käytetyissä laimennuksissa kaikkien tutkittujen jätevesien toksisuuteen ja ekosysteemin toiminnan estymiseen viittaavat vaikutukset olivat vähäisiä ja, että vaikutukset enemmänkin olivat rehevöittäviä. Jäteveden käsittely pilot-mittakaavaisesti aktiivilietelaitoksessa ei vähentänyt TCF-jäteveden vaikutuksia, mutta pienensi ECF-jäteveden vaikutuksia. Aikaisempiin metsäteollisuuden jätevesillä tehtyihin malliekosysteemikokeisiin verrattuna tutkittujen jätevesien vaikutuspotentiaali oli pienempien joukossa. Vaikutuspotentiaalin ja jätevedessä olevan hajoavan orgaanisen aineen määrällä todettiin keskinäistä riippuvuutta, mutta vaikutusten ja AOX:n välistä riippuvuutta ei voitu osoittaa. Klooriton TCF-jätevesi aiheuttaa samanlaisia vaikutuksia kuin ECF-jätevesi.

Tutkimuksia on jatkettu projektin II vaiheessa tutkimalla havupuumassa tuotannosta aiheutuvia valkaisun ECF- ja TCF-valkaisun jätevesiä. Nyt tutkitut jätevedet ovat peräisin samasta tehtaasta (Wisaforest) kuin vaiheessa I tutkitut lehtipuumassan tuotannosta aiheutuneet valkaisu-jätevedet. Valkaisu-jätevesien lisäksi projektin II vaiheessa on tutkittu käsitellyn yhdyskuntajäteveden ja luonnontilaisen suoveden vaikutuksia malliekosysteemeissä. Malliekosysteemi- tutkimukset aloitettiin kesällä 1995 ja altistus jatkui vuoden 1996 marraskuuhun asti. Tässä tutkimuksessa on siten mukana aikaisemmista tutkimuksista poiketen myös malliekosysteemialtaiden talviaikainen altistus. Tutkimukset on tehty Suomen Ympäristötutkijaryhmän Nauvon tutkimusasemalla. Tutkimusten mikrobiologisen osan ja jätevesien toksisuutestauksen ovat tehneet Suomen Ympäristökeskuksen tutkijat. Jätevesien kemiallisen karakterisoinin on tehnyt Jyväskylän Yliopiston Kemian laitos.

Aineisto ja menetelmät



2.1 Tutkitut jätevedet

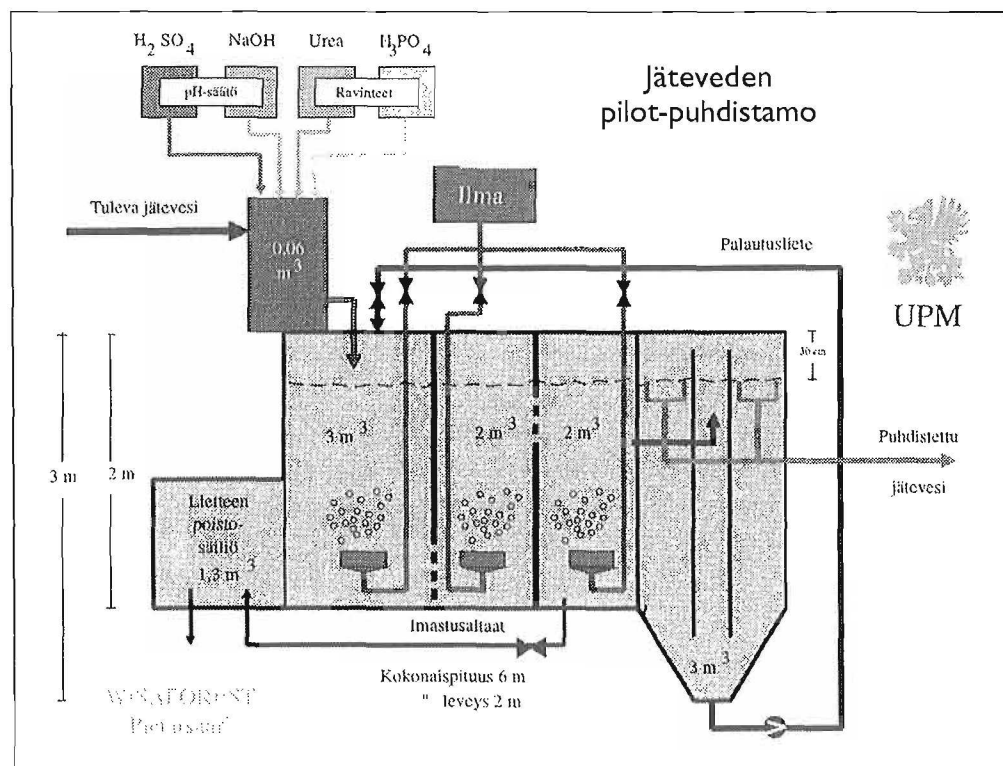
Tutkimuksissa käytetyt jätevedet olivat Wisaforest Oy:n havupuuajakson ECF- ja TCF-ajojen käsittelemättömiä ja pilot-aktiivilietelaitoksessa käsiteltyjä valkaisimon jätevesiä. Wisaforest Oy tuottaa valkaistua ja valkaisematonta sulfaattisellua sekä valkaistua ja valkaisematonta voimapaperia. Puuraaka-aineena käytetään havupuuta sekä lehtipuuta, josta osa on eucalyptusta. Tuotantomäärät olivat vuonna 1995 469 000 t valkaistua sulfaattisellua, 58 000 t valkaisematonta sulfaattisellua ja 134 000 t paperia.

Tehtaalla on valkaisulaitos, jossa on mahdollista valkaista joko klooridioksidilla (O-Z/D-OP/Ep-D-Ep-D) tai otsonilla ja peroksidilla (O-Qx-ZQ-OP/Ep-Z-P). Wisaforestin tehdaskaavio ja tehtaan prosessikuvaus on yksityiskohtaisemmin esitetty projektin I vaiheen loppuraportin yhteenveto-osassa (Verta ym. 1994). Wisaforestin sellutehtaan kokonaisjätevedet käsitellään aktiivilietelaitoksessa, jossa on esiselkeytys kuitupitoisille jätevesille ja lipeäosastojen jätevesille. Aktiiviliete-laitoksessa käsitelty jätevesi johdetaan jälkitasausaltaan ja jälki-ilmastusaltaan kautta mereen. Viipymä aktiivilietelaitoksessa on n. 15 h ja jälkitasausaltaassa n. 1,5-2 vrk. Vuonna 1995 päästöt vesistöön olivat:

| | | |
|-------------------|--------|-------------|
| kiintoaine | 1 890 | t/a |
| BOD | 1 530 | t/a |
| COD _{Cr} | 25 000 | t/a |
| AOX | 0.49 | kg/t sellua |
| P | 26 | t/a |
| N | 251 | t/a |

Tässä tutkimuksessa käytetyt valkaisu-jätevedet käsiteltiin pilot-mittakaavaisessa aktiivilietelaitoksessa, jonka kaavio on esitetty kuvassa 1. Havupuuajakson ECF-valkaisun jätevedet, alkaalinen ja hapan suodos sekoitettiin pilotin syöttösäiliöön suhteessa 1:2 ja puhdistus suoritettiin pilotin linjalla 1. Tutkimuksiin tarvittavat jätevesinäytteet otettiin tulevasta jätevedestä 3.7.1995 ja puhdistetusta jätevedestä 4.7.1995. Havupuuajakson TCF-valkaisun jätevedet, alkaalinen ja hapan suodos sekoitettiin pilotin syöttösäiliöön suhteessa 2:1 ja puhdistus suoritettiin pilotin linjalla 1. Tutkimuksiin tarvittavat jätevesinäytteet otettiin tulevasta ja puhdistetusta jätevedestä 5.9.1995. Pilot-laitoksen toiminnasta on laadittu erillinen raportti.

Metsäteollisuuden jätevesien lisäksi tutkittiin Rauman kaupungin jäteveden puhdistuslaitokselta ulosmenevä jätevesi sekä Oriveden Lakkasuolta kerätty vesi. Lakkasuo on luonnontilainen suo ja se kuuluu Hämeen ympäristökeskuksen jatkuvan tarkkailun piiriin. Suovesinäyte kerättiin suon tarkkailupadolta 28.6.1997 ja Rauman kaupungin jätevesi 29.6.1997. Rauman kaupungin jätevedet käsitellään biologisesti ja kemiallisesti. Kemiallinen käsittely käsittää ferrosulfaattisaostuksen hiekkasuoatituksen yhteydessä. Ferrosulfaattia (FeSO₄) lisätään 60 g/m³. Rauman kaupungin viemäriverkkoon ei ole liittyneenä teollisuuslaitoksia ja jätevettä voidaan pitää normaalina asumajätevetenä.



Kuva 1. Kaavakuva jäteveden pilot-puhdistamosta.

Tutkittujen jätevesien kemiallisia ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1.

Jätevedet sekä suovesi kerättiin 1 m³:n kokoiisiin säiliöihin, joissa ne kuljetettiin tutkimusasemalle, jossa ECF-jätevedestä poistettiin kloraatti typpikaasun avulla. Kuljetuksen jälkeen vedet siirrettiin 30 l:n astioihin ja pakastettiin. Annostelun yhteydessä sulatettiin aina tarpeellinen määrä vettä pumpattavaksi malliekosysteemeihin. Tutkittavat jätevedet testattiin suo- ja yhdyskuntajätevettä lukuunottamatta kahdessa eri laimennuksessa:

HD = high dose, 400 kertainen laimennus (0,25%)

LD = low dose, 2000 kertainen laimennus (0,05%)

Suo- ja yhdyskuntajätevesi testattiin vain pienemmässä (HD,400) laimennuksessa. Laimennuksen ja annostelun yhteydessä huomioitiin prosessin todellinen vedenkulutus normalisoituna vastaamaan vedenkulutusta 50 m³/tonni massaa. Tämä siksi, että myös aikaisemmat malliekosysteemikokeet on tehty vastaavalla normalisoidulla vedenkulutuksella ja näin ollen tulokset ovat vertailukelpoisia.

Valkaisimon vedenkulutus ECF-ajon yhteydessä oli 25 m³/tonni massaa ja TCF-ajon yhteydessä 16,5 m³/tonni massaa. Pilot puhdistamon reduktiot eri kuormitusparametrien suhteen on ECF- ja TCF-ajon osalta esitetty taulukossa 2. ECF-ajossa saavutetut puhdistustulokset olivat COD-reduktion osalta huonoja. Tehtaan varsinaisen aktiivilietelaitoksen reduktiot ovat olleet BOD₅:n suhteen 90-95%, COD_{Cr}:n suhteen 35-45% ja AOX:n suhteen 35-45% kuukausikeskiarvona laskettuna. Tyypeä ja fosforia ei lisätä aktiivilietekäsittelyssä. Fosforin reduktio on ollut 60%. Varsinaisessa aktiivilietelaitoksessa typen reduktiota ei ole, koska aktiivilietelaitos sitoo ilmakehän tyypeä noin 300 kg/vrk.

Taulukko 1. Tutkimuksissa käytettyjen jätevesien kemiallisten analyysien tulokset. Luvut on ilmoitettu mg/l.

| | ECF- valkaisu | ECF- pilot | TCF- valkaisu | TCF- pilot | SUO | KUNTA |
|-------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|-------|-------|
| BOD ₇ | 432 | 51 | 369 | 133 | <2 | 11 |
| COD _{Cr} | 1952 | 1389 | 1442 | 629 | 137 | 65 |
| TOC | 733 | 490 | 564 | 250 | 38 | 20 |
| AOX | 22,2 | 17,1 | 0,77 | 0,75 | 0,13 | 0,11 |
| EOX | 0,42 | 0,11 | - | - | 0,013 | 0,018 |
| Kiintoaine | 34 | 3 | 22 | 17 | | 15 |
| tot-N | 8,1 | 2,3 | 4,8 | 2,6 | 1,8 | 13,2 |
| tot-P | 1,3 | 0,12 | 1,6 | 0,75 | 0,04 | 0,26 |

Taulukko 2. Puhdistusteho (%) pilot puhdistamossa.

| | ECF-ajo | TCF-ajo |
|-------------------|---------|---------|
| BOD ₇ | 88 | 64 |
| COD _{Cr} | 29 | 56 |
| AOX | 23 | 3 |
| TOC | 33 | 56 |
| Kiintoaine | 91 | 22 |
| Typpi | 71 | 45 |
| Fosfori | 91 | 53 |

TCF-ajon osalta BOD reduktiota ei voida pitää parhaana mahdollisena. ECF-ajon typpi- ja fosforireduktiot olivat selvästi suurempia kuin vastaavat TCF-ajon reduktiot.

Testattujen valkaisimojätevesien sekä suo ja käsitellyn yhdyskuntajäteveden kemiallinen karakterisointi on tehty Jyväskylän Yliopiston Kemian laitoksella, ja tutkimuksista on toimitettu erilliset raportit (Mikkelson & Paasivirta 1996; 1997). Tutkittujen vesien kemiallisessa karakterisoinnissa näytevesistä tutkittiin neutraaliaineet, heikot hapot (fenoli- ja anisolibfraktio) ja vahvat hapot kukin omasta, uudesta näytevesimäärästä. Taulukossa 3 on esitetty analyyseissä havaittujen yhdisteiden kokonaismäärät fraktioittain. Tunnistettujen yhdisteiden molekyylipainot vaihtelevat 90 ja 500 Daltonin välillä (Mikkelson & Paasivirta 1996).

Kokonaismassaa tarkasteltaessa väheni pilot-aktiivilietelaitoksessa TCF-jätevesinäytteiden tunnistetuista aineista 78 % ja ECF-jätevesinäytteiden tunnistetuista aineista 74 %. Aineryhmittäinen tarkastelu osoitti kuitenkin huomattavia eroja eri näytteiden ja yhdisteryhmien kesken. Muutamien yhdisteryhmien massat lisääntyivät aktiivilietekäsittelyssä (Mikkelson & Paasivirta 1997). Yhdisteryhmien kokonaispitoisuudet käsittelemättömissä valkaisu-jätevesissä erosivat suuresti toisistaan. TCF-jätevedessä vallitsevat alifaattiset karboksyylihapot, mutta ECF-jätevedessä oli huomattavasti enemmän hartsihappoja (Mikkelson & Paasivirta 1997). Pääkomponenttianalyysi yhdisteryhmien pitoisuuksien vaihteluista näytteissä osoitti, että käsittelemätön ECF-valkaisu-jätevesi poikkeaa muista sisältäen runsaasti yhdisteitä, jotka hajoavat aktiivilietekäsittelyssä. Suovesi eroaa myös muista sisältäen runsaasti tyydyttyneitä hiilivetyjä.

Taulukko 3. Jätevesien kemiallisessa karakterisoinnissa tunnistettujen yhdisteiden kokonaismäärät ($\mu\text{g/l}$) fraktioittain (Mikkelsen & Paasivirta 1996).

| Fraktio valk. | ECF- pilot | ECF- valk. | TCF- pilot | TCF- | SUO | KUNTA |
|------------------|---------------|---------------|---------------|------|-----|-------|
| Neutraali | 440 | 113 | 186 | 86 | 222 | 238 |
| Fenoli | 244 | 17 | 40 | 12 | 834 | 69 |
| Anisoli | 182 | 73 | 78 | 26 | 24 | 45 |
| Happo | 4926 | 1087 | 8444 | 1921 | 196 | 834 |

Tässä yhteydessä ei yksityiskohtaisesti tarkastella eri fraktioita ja yhdisteiden määriä eri jätevesissä. Kaikkien fraktioiden kohdalla yhdisteiden kokonaismäärät olivat kuitenkin pienempiä pilot-käsitellyissä jätevesissä. Happofraktiota lukuunottamatta yhdisteiden määrät olivat ECF-jätevedessä suurempia kuin TCF-jätevedessä. Fenolifraktion yhdisteiden kokonaismäärä oli suovedessä selvästi muita tutkittuja vesiä suurempi. Suo- ja yhdyskuntajäteveden neutraali- ja fenolifraktioissa yhdisteiden kokonaismäärät olivat suurempia kuin käsiteltyjen valkaisu-jätevesien vastaavat määrät. Anisoli- ja happofraktiossa kokonaismäärät olivat pienempiä tai yhtäsuuria kuin käsitellyissä valkaisu-jätevesissä. Fenoli-fraktiota lukuunottamatta yhdisteiden kokonaismäärät olivat käsitellyssä yhdyskuntajätevedessä suurempia kuin suovedessä.

2.2 Jätevesien myrkyllisyys

Malliekosysteemikokeissa tutkittujen pakastettujen vesinäytteiden myrkyllisyys arvioitiin valobakteeri-, levä ja vesikirpputesteillä Suomen ympäristökeskuksen laboratoriossa. Tarkoituksena oli saada tietoa malliekosysteemiin syötettävien vesien edustavuudesta, eli myrkyllisyydestä verrattuna edellisten tutkimuksien vesien myrkyllisyyteen mitattuna samoilla testeillä.

Valobakteeritesti on yksinkertainen ja suhteellisen herkkä biotesti jätevesien myrkyllisyyden arvioimiseksi. Valobakteerin valontuoton estyminen kertoo heterotrofisten mikrobien energia-aineenvaihdunnan häiriöistä sen altistuessa haitallisille aineille. Yksisoluiset levät on usein todettu herkiksi myrkyvaikutusten ilmentäjiksi. Levätestissä tutkitaan jätevesinäytteiden vaikutuksia viherlevän kasvuun. Testattavan näytteen vaikutus voi olla leväkasvua estävä tai kiihdyttävä. Vesikirpputesti on yksi yleisimmin käytetyistä myrkyllisyystesteistä. Sen avulla arvioidaan jätevesinäytteen akuutti myrkyllisyys nuorille vesikirpuille.

Testattavat vedet on kuvattu kohdassa 2.1.

Valobakteeritesti

Testimikrobina käytettävä *Vibrio fisheri* on yleinen meriympäristön heterotrofinen bakteeri. Tämä gram- negatiivinen bakteeri vastaa aineenvaihdunnaltaan muita ympäristön heterotrofisia bakteereja, paitsi se tuottaa normaalin aineenvaihdunnan osana valoa näkyvällä aallonpituudella. Ilmiön aiheuttaa lusiferaasientsyymi, jolle siirtyy energia suoraan hengityskoneistosta. Testi perustuu *V.fisheri*-bakteerin valontuoton vähenemiseen, jos se altistuu haitallisille aineille. Tämä valontuoton inhibitio kertoo vakavista häiriöistä välttämättömässä aineenvaihdunnassa (Bulich ym. 1981).

Testeissä noudatettiin pääsääntöisesti kansainvälistä standardiehdotusta ISO/DIS 11348 (vastaa Microtox[®]-menetelmää) eroavuutena bakteerisiirroksen valmistus. Kahden päivän ikäisten valobakteeripesäkkeiden (*Vibrio fisheri* NRRL B-11177, jota ennen virheellisesti kutsuttiin *Photobacterium phosphoreum*:iksi) valontuotto tarkistettiin ja maljalta poimittiin pesäkkeitä rekonstituutioliuokseen. Suspension same-

us (n. 1 McF, McFarland Standard Unit) ja valontuotto vakioitiin. Tätä siirrosta pipetoitiin 10 ml kuhunkin testiputkeen 490 ml:aan 2 %:een NaCl liuokseen. Putkien annettiin stabiloitua 15 °C:ssa ennen alkuluminensesnsin mittausta ja näytelaimennosten pitetoimista niihin. Pakastettujen vesinäytteiden alkuperäinen pH mitattiin sulatuksen jälkeen ja säädettiin 7: ksi myrkyllisyystestejä varten. Valontuottoa näytelaimennoksissa verrattiin kontrollinäytteen (2 % NaCl deionisoidussa vedessä) valontuottoon. referenssikemikaalina oli 3,5- dikloorifenoli. Mittaustuloksista laskettiin valontuoton estymisprosentti eri laimennoksissa ja arvioitiin annos-vastekäyrältä näytteen EC50 pitoisuus (EC50 pitoisuudessa valontuotto on puolet kontrollista) ja TU-arvo (Toxicity Unit = 100/EC50 laimennos prosentteina).

Levätesti

Levätesti tehtiin standardin SFS 5072 mukaan Poikkeuksena oli kuitenkin levänkasvun mittaamenetelmä, joka tehtiin fluorometrisesti ISO 8692 standardin mukaan. Pakastetut näytteet sulateettiin ja suodatettiin (lasikuitusuodatin, 0,2 mm) sameuden ja kilpailevan mikrobikasvun ehkäisemiseksi. Näytteiden pH mitattiin ja säädettiin 7:ksi. Testit aloitettiin siirostamalla näytelaimennoksiin (1 %, 3,2 %, 10 %, 32 % ja 50 %) leväsiirrosta (*Selenastrum capricornutum* Prinzt, nykyinen nimi *Raphidocelis subcapitata*) siten, että levätiheys testin alussa n. 3 x 10⁴ solua /ml. Levien kasvua mitattiin 24, 48 ja 72 tunnin jälkeen kokeen alusta fluorometrisesti (Sequoia-Turner, model 450 Fluorometer, suodattimilla NB440(eksitaatio) ja SC665 (emissio). näytteiden fluoresenssi mitattiin siirostamatonta näytelaimennosta vastaan. Mittaustuloksista piirrettiin levien kasvukäyrät eri näytelaimennoksista ja arvioitiin annos-vastekäyrältä näytteen EC50 pitoisuus ja TU- arvo.

Vesikirpputesti

Vesikirpputesti tehtiin ISO:n standardiohjeen (ISO 6341) mukaisesti. Testissä määritetään näytteen pitoisuus, joka tekee puolet koe-läimistä liikuntakyvyttömiksi 24 tunnin koeaikana. Kuhunkin näytelaimennoksen koeastiaan pipetoitiin testin alussa viisi alle vuorokaudenikäistä *Daphnia magna*- vesikirppua, joiden liikuntakykyä tarkailtiin testin kuluessa. Näytteiden pH säädettiin 7:ksi. Testin lopussa arvioitiin näytelaimennos annosvastekäyrältä, joka aiheutti liikuntakyvyn meneteyksen puolella kirpuista.

2.3 Malliekosysteemin koejärjestelyt

Malliekosysteemin rakenne perustuu alunperin Notinin (1977) esittämään periaatteeeseen. Malliekosysteemialtaat koostuvat ulkona sijaitsevista maalle pystytetyistä 8 m³:n altaista. Malliekosysteemi luodaan ”siirtämällä” osa vastaavaa luonnonsysteemiä (sekä kasvit että eläimet) jokaiseen altaaseen. Malliekosysteemiä ja vastaavaa luonnonekosysteemiä on vertailtu tutkimuksissa, joissa selvitettiin eri ekotoksikologisten tutkimusmenetelmien soveltuvuutta (Landner ym. 1989).

Käytettyjen malliekosysteemien tärkein eliöorganismi on rakkolevä, *Fucus vesiculosus*, joka muodostaa noin 90 % Itämeren rantavyöhykkeen biomassasta. Rakkoleväyhteisön tutkimuksen etuna on paitsi se, että se on Itämeren merkittävin osasysteemi myös se, että sen monimuotoisuus (diversiteetti) on suhteellisen pieni muihin merellisiin yhteisöihin verrattuna. Tavoitteena onkin ollut luoda malliekosysteemialtaisiin kattava ja tasapainoinen rakkoleväyhteisö ja pääpaino on ollut tämän yhteisön tutkimuksessa sedimentin eliöstön kanssa, kun taas kasvi- ja eläinplanktoniyhteisöjä on tarkasteltu enemmän yleisluonteisesti (ks. esim. Lehtinen ym. 1992; Lindén ym. 1987).

Malliekosysteemialtaissa pyritään jäljittelemään matalaa, suojaista Itämeren hiekkapohjaista lahtea, jossa kivet muodostavat kiinnitysalustan rakkolevälle. Luonnonolosuhteissa vesimassojen virtaukset systeemin läpi ovat suurempia kuin malli-ekosysteemialtaissa. Koska rakkolevät saavat tarvitsemansa ravinteet malli-ekosysteemialtaiden sisään tulevan veden kautta on tärkeää, että rakkolevän biomassassa sopeutetaan malliekosysteemialtaiden läpi virtaavan veden määrään. Täten saavutetaan paras yhdenmukaisuus vastaavan luonnonekosysteemin kanssa.

Malliekosysteemialtaissa on tehty perusteellisia selvityksiä sisään tulevan veden virtausmäärien ja rakkolevän kasvun välisestä riippuvuudesta. Näiden selvitysten perusteella veden teoreettiseksi vaihtuvuudeksi malliekosysteemialtaissa on päätetty 2 vuorokautta (2,8 l/min). Väriainetutkimuksilla on voitu osoittaa, että suuntaamalla sisään tuleva vesisuihku vinosti pohjaa vasten saadaan aikaan virtausnopeus, jossa vesi kiertää altaan noin 3-4 minuutissa. Teoriassa tämä tarkoittaa, että vesi ehtii kiertää altaan 360-480 kertaa vuorokauden aikana.

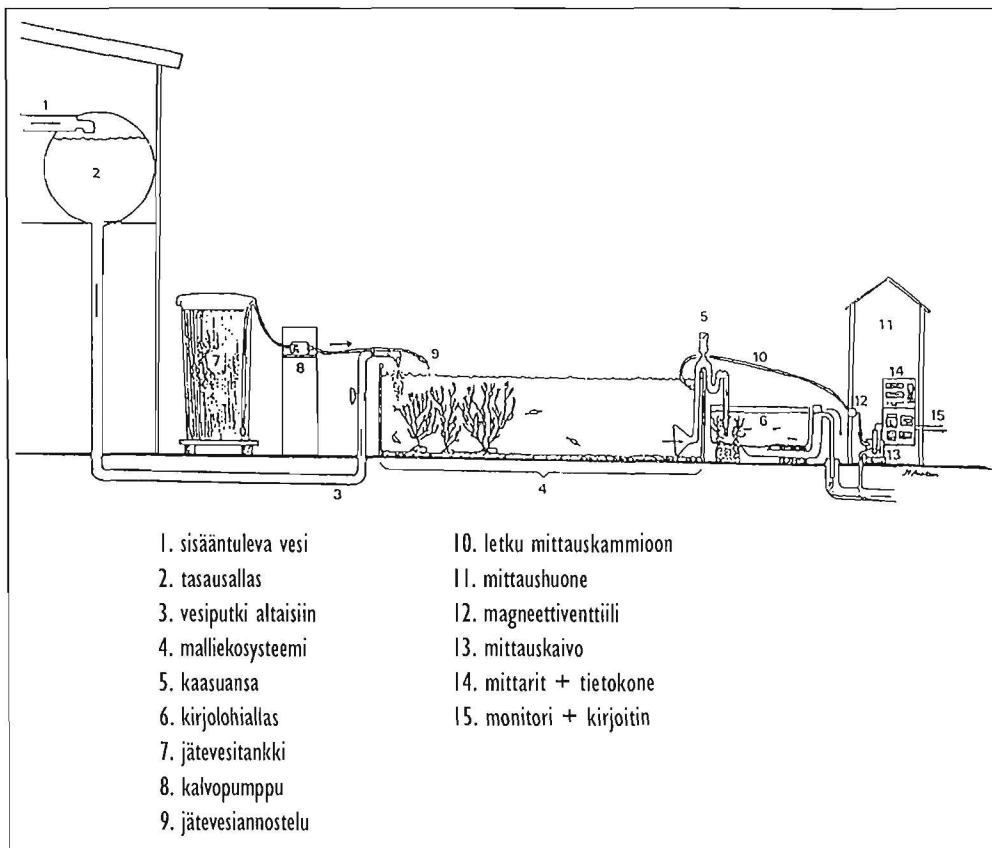
Malliekosysteemialtaiden poistoputket on peitetty verkolla (1x1 mm), jolloin estetään suurempien eliöiden poistuminen altaista. Sisään tulevast vedestä sekä altaiden poistovedestä osa johdetaan mittauskammioon, jossa tapahtuu veden lämpötilan, johtokyvyn, pH:n ja happipitoisuuden automaattinen mittaus. Eri altaista tuleva vesi mitataan kerran tunnissa ja mittauksen säätely tapahtuu tietokoneohjatun venttiilijärjestelmän avulla. Eri altaiden mittaukselliset tulokset tallennetaan tietokoneelle ja niiden avulla lasketaan ekosysteemin aineenvaihduntaa, vertaamalla sisään tulevaa ja ulosmenevää vettä siten, että laskelmissa on huomioitu veden virtausnopeudet ja kaasun diffuusiovakiot. Myös allasalueelle tulevan valon määrä mitattiin jatkuvasti. Kaavakuva koejärjestelyistä on esitetty kuvassa 2.

Malliekosysteemikokeiden aluksi altaiden pohja (10 m²) peitettiin puhtaalla eliöistä vapaalla hiekalla. Hiekan kokonaismäärä altaasta kohden oli noin 400 l, joka muodostaa 3-4 cm paksun sedimenttikerroksen. Tämän jälkeen altaat täytettiin vedellä. Malliekosysteemialtaisiin siirrettävät kiviin kiinnittyneet rakkolevät kerättiin tutkimusaseman ulkopuoliselta merialueelta ja asetettiin altaisiin siten, että ne peittävät 1/3 altaan pohjasta. Rakkolevien siirto tapahtuu siten, että muovipussi (40 x 60 cm) asetetaan varovasti rakkolevän ja kiven yli, jolloin rakkolevässä oleva eliöstö saadaan myös mukaan. Rakkolevät kuljetettiin muovipusseissa asemalle, jossa niiden tilavuus määritettiin ja ne siirrettiin välittömästi ja sattumanvaraisesti eri altaisiin. Jokaiseen altaaseen laitettiin tilavuudeltaan sama määrä rakkolevää (6,0 l) ja myös rakkoleväyksilöiden määrä pyrittiin saamaan yhdenmukaiseksi kaikissa altaissa. Rakkolevien mukana tulleiden eri eliölajien määrät arvioitiin ja mikäli johonkin altaaseen tuli vähemmän eliöitä niitä täydennettiin, jotta kussakin altaassa oli sama määrä eliöitä kokeiden alussa. Päälyskasvustoleviä tutkittiin asettamalla 20x20 cm muovilevyjä roikkumaan altaan yli pingotettuun naruun. Erityisissä verkkolaatikoissa pidettiin lisäksi esipunnittuja sinisimpukoita, *Mytilus edulis*, tavoitteena tutkia niiden kasvua ja henkiinjäämistä.

Rakkolevän mukana tulleiden eläinten lisäksi malliekosysteemialtaisiin laitettiin 80 kpl:ta kolmipiikin, *Gastorosteus aculeatus*, vastakuoriutuneita poikasia. Malliekosysteemialtaisiin siirrettyjen eliöiden lisäksi altaisiin tulee sisään tulevan veden mukana eri eliölajien munia ja toukkia, jotka jäävät elämään malliekosysteemialtaiden pohjalle sedimenttiin, joka de facto on eliöistä vapaa kokeiden alussa. Tämän perusteella sedimentti muodostaa mielenkiintoisen tutkimuskohteen, koska sedimenttiin kohdistuvat vaikutukset heijastuvat eliöiden yhteisöihin ja kehitykseen.

Altaisiin luodut ekosysteemit saivat tasaantua ja vakiintua 2-3 viikkoa ennen altistusten aloittamista. ECF-valkaisujäteveden, suoveden ja käsitellyn yhdyskunta-jäteveden altistukset alkoivat 6.7.1995 ja TCF-valkaisujäteveden altistus 7.9.1995.

TCF-jäteveden altistus viivästyi, koska ko. vettä ei ollut aikaisemmin saatavissa. Kokeet kestivät marraskuuhun 1996 l. noin vuoden ja 4 kuukautta.



Kuva 2. Kaavakuva malliekosysteemistä.

2.4 Malliekosysteemin näytteenotto ja mittausmenetelmät

2.4.1 Toiminnalliset muuttujat

Sisääntulevan veden sekä malliekosysteemialtaista poistuvan veden näytteenotto ja veden happipitoisuuden, pH:n ja lämpötilan mittaus tehtiin allasta kohden kerran tunnissa sekä tasaus- että altistusjakson aikana.

Systeemien nettoperustuotanto ja hengitys laskettiin tunneittain saaduista poistoveden hapen, pH:n ja lämpötilan mittauservoista. Epäorgaanisen hiilen kokonaispitoisuus altaiden ulosmenevässä vedessä laskettiin Gargaksen (1975) mukaan.

Murtoveden epäorgaanisen hiilen määrässä tapahtuu vuorokautista vaihtelua, joka heijastuu pH:n muutoksena. Auringonvalo lisää kasvien perustuotantoa, jolloin veden hiilipitoisuus vähenee ollen minimissään iltapäivällä. Hiilipitoisuus lisääntyy yöllä, jolloin tapahtuu vain hengitystä, saavuttaen maksimiarvon aikaisin aamulla. Happipitoisuudella on vastaavanlainen vuorokausivaihtelu, mutta minimiarvo saavutetaan aamulla ja maksimiarvo iltapäivällä. Hengitys tuntia kohden on puolestaan laskettu aamuyön lisääntyvien epäorgaanisten hiilipitoisuuksiin regressiosta kello 01.00 ja 04.00 välisenä aikana. Tämä hengitysnopeus on sen jälkeen kerrottu 8:lla vertailukelpoiseksi nettotuotannon vuorokausiarvojen kanssa. Laskelma perustuu oletukseen, että hengitys on koko vuorokauden aikana yhtä suuri.

Partikkelimaisen aineksen sedimentaatio mitattiin suppilomaisilla (halkaisija 100 mm) keräilijöillä, jota oli sijoitettu 30 cm pohjan yläpuolelle. Kussakin altaassa oli kolme keräilijää, yksi veden sisääntulon kohdalla, yksi altaan keskellä ja yksi poistoputken kohdalla. Keräilysuppilot tyhjennettiin kerran viikossa, jolloin niissä ollut vesi ja partikkelit suodatettiin esipunnitun suodattinkalvon läpi. Suodatuksen jälkeen suodattinkalvot ilma kuivattiin 24 tunnin ajan, jonka jälkeen ne punnittiin uudestaan ja laskettiin sedimentoituneen aineksen määrä.

Sedimentin orgaanisen hiilen määrä saatiin määrittämällä altistuksen lopussa häiriintymättömästä sedimentistä otetun sedimentinäytteen hehkutusjäätös.

Ravinneainemääriä varten otettiin vesinäytteet avovesiaikana kahdesti kuukaudessa ja talvella kerran kuukaudessa. Vesinäytteet pakastettiin ja toimitettiin pakastettuina Tallinnan Teknillisen Korkeakoulun vesiensuojelu-laboratorioon analysoitavaksi.

Kokonaisorgaanisen hiilen määrittämiseksi otettiin vesinäytteet altaiden sisääntulevasta ja ulosmenevästä vedestä kerran viikossa. Tuloveden ja kunkin altaan poistoveden näytteet pakastettiin kokoomänäytteiksi. Sisääntulevan ja ulosmenevän veden välinen ero kuvaa osaa ekosysteemin kyvystä sitoa hiiltä.

2.4.2 Rakenteelliset muuttujat

Rakkolevän kasvu mitattiin *in situ* kerran kuukaudessa. Kokeen lopussa määritettiin altaiden rakkolevän jäljellä ollut kokonaisbiomassa.

Päällyskavustolevien (perifyton) kasvu mitattiin kerran kuukaudessa muovilevyiltä, jotka oli asetettu riippumaan malliekosysteemiaita pinnalle noin 10 cm:n syvyyteen. Esipunnitut levyt kuivattiin uunissa 24 tunnin ajan (60 °C), jonka jälkeen ne punnittiin uudestaan ja levien kuivapaino määritettiin painojen erotuksen avulla.

Veden klorofylli-a määritettiin SFS-standardin mukaisesti viikottain kesäkuukausina ja joka toinen viikko myöhemmin kesällä ja talvella.

Kolmipiikin vastakuoriutuneita poikasia laitettiin 80 kpl jokaiseen altaaseen kokeiden alussa. Poikaset pyydettiin tutkimusaseman edustalla olevasta lahdesta ja asetettiin sattumanvaraisesti altaisiin. Pyynnin yhteydessä otettiin noin 100 poikasen näyte poikasten lähtöpainon määrittämiseksi. Altistuksen lopussa kerättiin kaikki altaissa jäljellä olevat kolmipiikit. Niiden pituus ja paino mitattiin keskimääräisen kasvun ja altaiden kalatuoton määrittämiseksi.

Rakkolevässä elävien selkärangattomien eliöiden kokonaismäärä ja -biomassa määritettiin kokeen lopussa allaskohtaisesti altaassa olevasta rakkolevän kokonaismäärästä. Sedimentin selkärangattomien määrä ja biomassa määritettiin kahdeksasta (8) kokeen alussa sedimenttiin sijoitetusta astiasta (100 x 100 x 30 mm). Astiat oli kokeen alussa täytetty samalla hiekalla kuin altaiden pohjat ja ne oli sijoitettu sisälle hiekkaan siten, että niiden pinta oli pohjan pinnan tasalla.

Verkkolaatikoissa olleiden simpukoiden paino määritettiin kerran kuukaudessa.

Kokeissa todetut toiminnalliset ja rakenteelliset vasteet on pyritty suhteuttamaan mahdollisuuksien mukaan altaiden akkumuloituneeseen lämpöenergiaan. Veden lämpötila nousee malliekosysteemiaissa päivällä kasvukauden aikana. Kasvukaudeksi määritellään tässä tapauksessa se koejakson aika, jolloin malliekosysteemin lämpötila päivällä nousee suhteessa sisääntulevan veden

lämpötilaan. Ajanjakso, jolloin malliekosysteemin veden lämpötila on yhtä suuri tai alhaisempi kuin sisääntulevan veden määritellään kasvukauden loppumiseksi ja systeemi alkaa menettää energiaa. Malliekosysteemin käytettävissä oleva energia voidaan kuvata akkumuloitujen Celcius-asteiden määränä kasvukauden valoisuuden jakson aikana.

Tulokset

3.1 Jätevesien myrkyllisyys

Testattujen vesinäytteiden myrkyllisyys on esitetty EC50- pitoisuuksina ja TU-arvoina taulukossa 4 sekä TU-arvoina kuvassa 3.

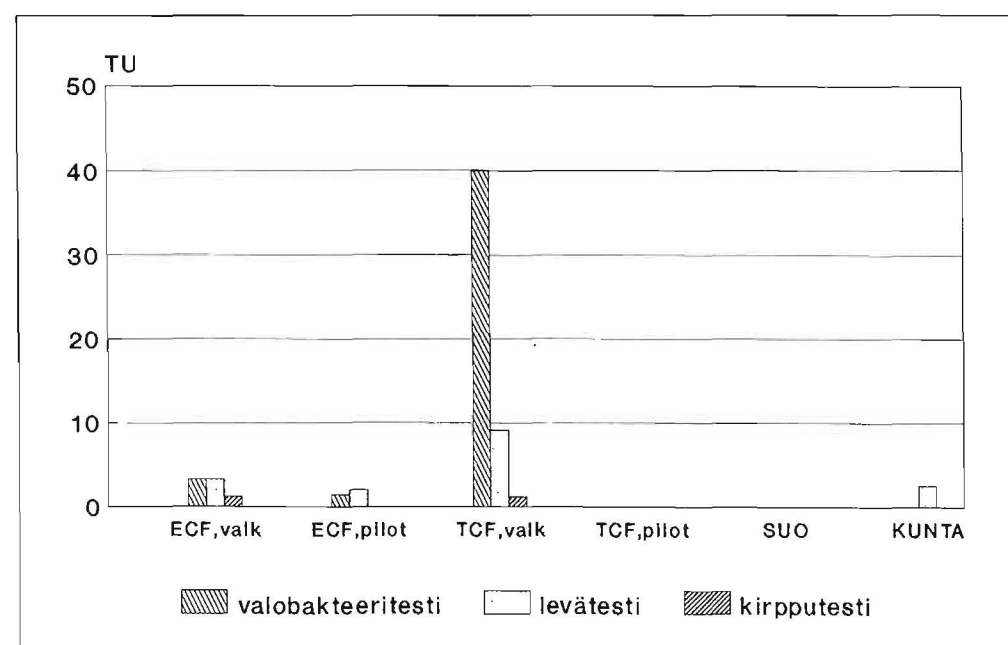
Käsittlemättömien ja pilotlaitteistossa käsiteltyjen ECF- ja TCF- jätevesien myrkyllisyys vastasi jotakuinkin projektin aiemmissa tutkimuksissa testattujen jätevesien myrkyllisyyttä. Käsittlemättömät valkaisu-jätevedet olivat myrkyllisiä valobakteeri- ja levätesteissä. Biologisen jätevedenpuhdistuksen läpikäyneissä vesissä myrkyllisyys väheni selvästi. Tutkituista vesistä TCF- jätevesi näytti olevan ECF-jätevettä myrkyllisempää. Vesikirpputestillä käsittelemättömissä jätevesissä havaittiin ainoastaan viitteitä myrkyllisyydestä.

Kunnallinen puhdistettu jätevesi aiheutti lievän vasteen ainoastaan levätestissä ja testattu humusvesinäyte (suovesi) ei ollut lainkaan myrkyllinen.

Taulukko 4. Malliekosysteemeissä tutkittujen vesinäytteiden myrkyllisyys eri biotesteissä.

| | valobakteeritesti | | levätesti | | kirpputesti | |
|-------------|-------------------|-----|-----------|-----|-------------|-----|
| | EC50 | TU | EC50 | TU | EC50 | TU |
| suovesi | em* | | em | | | |
| kunta j.v. | em | | 40 % | 2,5 | | |
| ECF-valk. | 30 % | 3,3 | 30 % | 3,3 | 80 | 1,2 |
| ECF-puhd. | 70 % | 1,4 | 50 % | 2,0 | | |
| TCF-valk. | 2,5 % | 40 | 11 % | 9,1 | 80 | 1,2 |
| TCF-puhd.em | | | 17 % | 5,9 | | |

* ei myrkyllinen



Kuva 3. Tutkittujen jätevesien myrkyllisyys TU-arvoina (Toxic Unit).

3.2 Jätevesien aiheuttama kuormitus

Tutkittujen jätevesien sisältämä orgaaninen aines ja ravinnesuolat on esitetty taulukossa 2 (kohta 2.1). Näiden yhdisteiden vastaavat teoreettiset pitoisuudet malliekosysteemialtaissa on esitetty taulukossa 5. Orgaanisen aineen pitoisuudet olivat käsittelemättömässä ECF-jätevedessä suuremmat kuin vastaavassa TCF-jätevedessä. Orgaanisen aineen reduktio käytetyssä pilot-mittakaavaisessa aktiivilietelaitoksessa oli lisäksi parempi TCF-jäteveden osalta, jonka seurauksena käsitellyn jäteveden pitoisuudet olivat merkittävästi pienemmät kuin vastaavan ECF-jäteveden. Esimerkiksi COD-reduktio oli puhdistuslaitoksessa TCF-jätevedelle 56 %, mutta ECF-jätevedelle vain 29 %. Vastaavanlainen ilmiö todettiin myös edellisessä tutkimuksessa lehtipuujakson jätevesillä, jolloin COD-reduktiot TCF-jätevedelle olivat 70 % ja ECF-jätevedelle 33 %, eli suuremmat kuin havupuu-jakson jätevesille.

Yksinkertainen vertailu BOD₇ ja COD välillä osoittaa, että TCF-jätevedessä olevat orgaaniset yhdisteet olisivat helpommin hajoavia kuin vastaavat ECF-jäteveden yhdisteet (BOD₇/COD suhde: TCF-valkaisu = 26 %, ECF-valkaisu = 22 %, TCF-pilot = 21 %, ECF-pilot = 4 %). Tätä olettamusta tukee myös pilot-puhdistuksessa tapahtunut COD-reduktio, joka on selvästi suurempi TCF-jätevedellä (56 %) kuin ECF-jätevedellä (29 %). Vastaavanlainen ilmiö todettiin myös projektin I vaiheen tutkimuksissa, jossa tutkittiin lehtipuujakson valkaisujätevesiä. Havupuu-jakson vesillä erot käsittelemättömien vesien välillä eivät kuitenkaan olleet niin suuria kuin lehtipuujakson vesillä, mutta toisaalta havupuu-jakson TCF-jäteveden BOD₇-reduktio ei ollut yhtä suuri kuin lehtipuujakson TCF-jätevedellä.

Valkaisimon vedenkulutus ECF-ajon yhteydessä oli 25 m³/tonni massaa ja TCF-ajon yhteydessä 16 m³/tonni massaa. Nämä vedenkulutusmäärät huomioiden on laskettu jätevesien kuormitusparametrien teoreettiset arvot malliekosysteemeissä sekä todelliset laimennusolosuhteet (Taulukko 5).

Taulukko 5. Jätevesien kuormitusparametrien teoreettiset pitoisuudet malliekosysteemi-altaissa.

| | ECF | | | | TCF | | | | SUO | KUNTA |
|------------------|----------|----|----------|----|-----------|----|-----------|----|------|-------|
| | LD | HD | LD | HD | LD | HD | LD | HD | HD | HD |
| Laimennus | 4000-800 | | 4000-800 | | 6250-1250 | | 6250-1250 | | 400 | 200 |
| COD µg/l | 490-2400 | | 340-1700 | | 230-1200 | | 100-503 | | 342 | 325 |
| BOD µg/l | 110-540 | | 13-63 | | 59-290 | | 21-110 | | 5 | 55 |
| TOC µg/l | 180-920 | | 122-610 | | 90-450 | | 40-200 | | 95 | 100 |
| AOX µg/l | 5,5-28 | | 4,0-21 | | 0,1-0,6 | | 0,1-0,6 | | 0,3 | 0,5 |
| Kiintoaine µg/l | 8,5-42 | | 0,8-3,7 | | 3,5-18 | | 2,7-14 | | 1,0 | 76 |
| FosforTot-P µg/l | 0,3-1,6 | | 0,03-0,2 | | 0,3-1,3 | | 0,1-0,6 | | 0,09 | 1,3 |
| Typpi Tot-N µg/l | 2,0-10 | | 0,6-2,9 | | 0,8-3,9 | | 0,4-2,1 | | 4,5 | 66 |

Laimennusolosuhteet ja vedenkäyttö huomioiden on COD kuormitus suurempi ECF-jätevesille altistetuissa malliekosysteemeissä verrattuna TCF-jätevesille altistettuihin malliekosysteemeihin. Suurin ero on pilot-käsiteltyjen jätevesien välillä, kun ECF-jätevesi aiheuttaa noin kolminkertaisen COD kuormituksen TCF-jäteveeseen verrattuna. TOC:n suhteen jätevesien aiheuttama teoreettinen kuormitus oli ECF-jätevesien osalta suurempi kuin TCF-jätevesien osalta. Suo- ja yhdyskuntajäteveden teoreettinen TOC kuormitus oli yhtä suurta ja samalla tasolla kuin käsitellyn ECF-jäteveden suuremmassa laimennuksessa aiheuttama kuormitus (Taulukko 5). Suo- ja yhdyskuntajäteveden todelliset laimennukset olivat jätevesilaimennoksia pienemmät, koska pyrkimyksenä oli saada TOC:n suhteen mahdollisimman yhdenmukaiset määrät. Suo- ja yhdyskuntajäteveden AOX-kuormitus on samalla tasolla kuin TCF-jäteveden.

Sisääntulevan murtoveden ja toisaalta jäteveden aiheuttamaa BOD₇- ja ravinne-kuormitusta seurattiin koko kokeen ajan allaskohtaisesti. Taulukossa 6 on esitetty allaskohtaisesti jäteveden aiheuttama BOD₇- ja ravinnekuormituksen osuus (%) ko. altaan kokonaiskuormituksesta koko altistusjakson aikana. Tulokset perustuvat altaaseen tulevasta vedestä ja jätevedestä otettuihin näytteisiin.

Taulukko 6. Jäteveden aiheuttama BOD₇- ja ravinnekuormituksen osuus (%) malliekosysteemialtaisiin koko altistuksen aikana tulleeesta kuormituksesta.

| | ECF-valk | | ECF-pilot | | TCF-valk | | TCF-pilot | | Suo | Kunta |
|------------------|----------|----|-----------|-----|----------|----|-----------|----|-----|-------|
| | LD | HD | LD | HD | LD | HD | LD | HD | HD | HD |
| BOD ₇ | 5 | 37 | 5 | 23 | 5 | 21 | 3 | 14 | 0,4 | 5 |
| Tot-P | 1 | 7 | 0,1 | 0,7 | 2 | 7 | 0,5 | 3 | 0,4 | 6 |
| Tot-N | 0,7 | 4 | 0,3 | 2 | 0,9 | 5 | 0,6 | 3 | 1,7 | 25 |

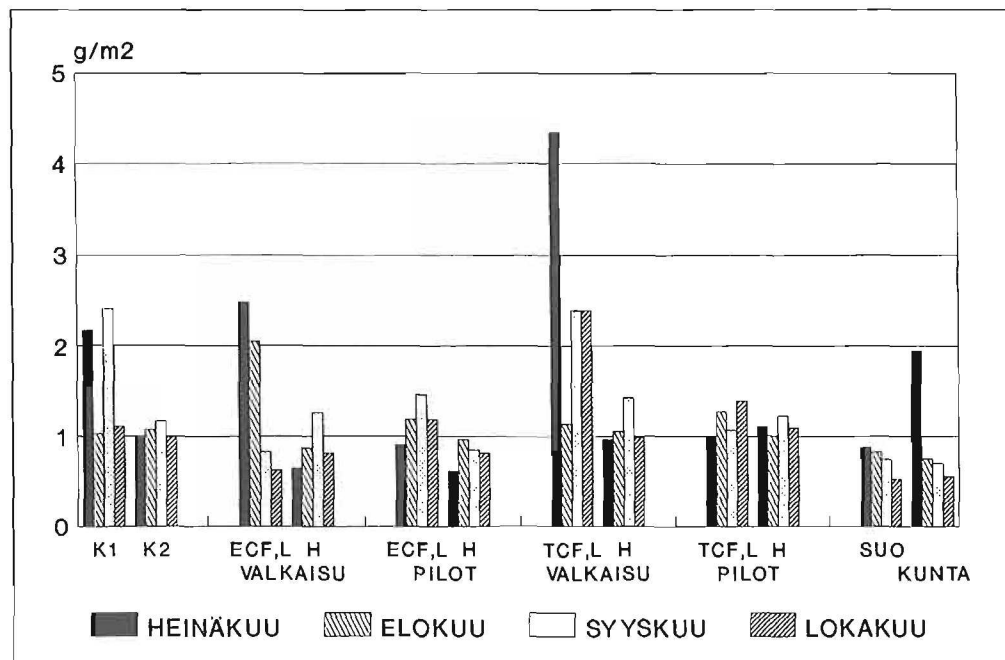
Mittausten mukaan ECF-jätevesille altistuneisiin malliekosysteemialtaisiin on kohdistunut suurempi BOD-kuormitus kuin TCF-jätevesille altistuneisiin malliekosysteemeihin. Taulukon 6 esittämien tulosten mukaan TCF-jätevedet ovat aiheuttaneet suuremman ravinnekuormituksen (Tot-P,Tot-N) kuin ECF-jätevedet. Taulukosta käy myös selville, että käsitelty jätevedet aiheuttavat selvästi pienemmän kuormituksen kuin käsittelemättömät jätevedet ja, että tässä suhteessa ECF-jäteveden ja TCF-jäteveden välillä on selvä ero. Käsitelty ECF-jätevesi aiheuttaa pienemmän kuormituksen kuin käsitelty TCF-jätevesi. Tämä on oletettavaa jo siitäkin syystä, että puhdistuksen aikana typpi- ja fosforireduktiot ovat olleet selvästi paremmat ECF-ajon aikana. Yhdyskuntajäteveden aiheuttama ravinne-kuormitus on ollut merkittävästi suurempaa kuin käsiteltyjen valkaisu-jätevesien aiheuttama ravinnekuormitus. Suoveden typpikuormitus on ollut noin kaksinkertainen ja fosforikuormitus samaa suusruusluokkaa kuin käsiteltyjen valkaisu-jätevesien suuremmassa laimennuksessa (1:2000).

3.3 Rakenteelliset vaikutukset

3.3.1 Vaikutukset perustuottajiin (kasvit)

Malliekosysteemialtaissa esiintyvän perifytonin (päälyllyskasvusto) määrää ja kasvua tutkittiin altaiden pinnalle ripustettujen muovilevyjen avulla. Perifytonin, joka kuvaa yksivuotisten levien tuotantoa, kasvu eri malliekosysteemialtaissa vuonna 1996 on esitetty kuvassa 4. Normaaaleissa olosuhteissa perifytonin määrä yleensä lisääntyy kasvukauden aikana ja myöhemmin syksyllä lämpötilan laskiessa yksivuotiset levät kuolevat, joka näkyy perifytonin määrän vähentymisenä. Vuoden 1995 aikana perifytonin biomassassa eri altaiden välillä ei voitu todeta merkittäviä eroja.

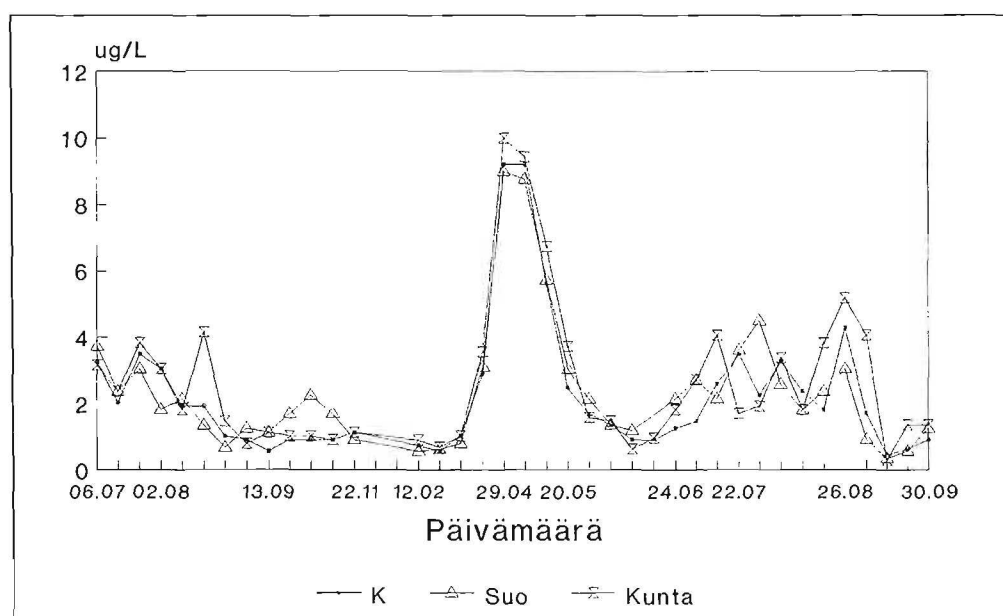
Kontrollien K1 ja K2 välinen perifytonbiomassojen ero saattaa johtua näiden kahden altaan lämpötilaerosta. K2 oli päiväsaikaan kauemmin varjossa kuin K1. Selvimpiä vaikutuksia on nähtävissä suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa malliekosysteemeissä, joissa perifytonin biomassa ei ole lisääntynyt lainkaan kasvukauden aikana, vaan päinvastoin pienentynyt. Tutkituista valkaisu-jätevesistä merkittävimmin ja selvimmin muutoksen aiheuttivat käsittelemättömät ECF- ja TCF-jätevedet (ECF,L; TCF,L valkaisu, Kuva 4) suuremmassa laimennuspitoisuudessa. Näissä altaissa perifytonin biomassa oli varsinkin vuoden 1996 kasvukauden alussa selvästi lisääntynyt. Muistutettakoon, että ECF,L valkaisu ja TCF,H-pilot ryhmiä tulee vertailla kontrollin K2 kanssa, koska nämä altaat olivat lämpötilan



Kuva 4. Päälliskasvuston (perifyton) kuukausittainen biomassa (g/m^2) malliekosysteemialtaissa vuonna 1996.

suhteen samanlaisia. Muita ryhmiä vertaillaan kontrolliin K1. Muissa ryhmissä perifytonin biomassat olivat yleensä vertailua vähän pienemmät, mutta dynamiikka näyttää toimineen.

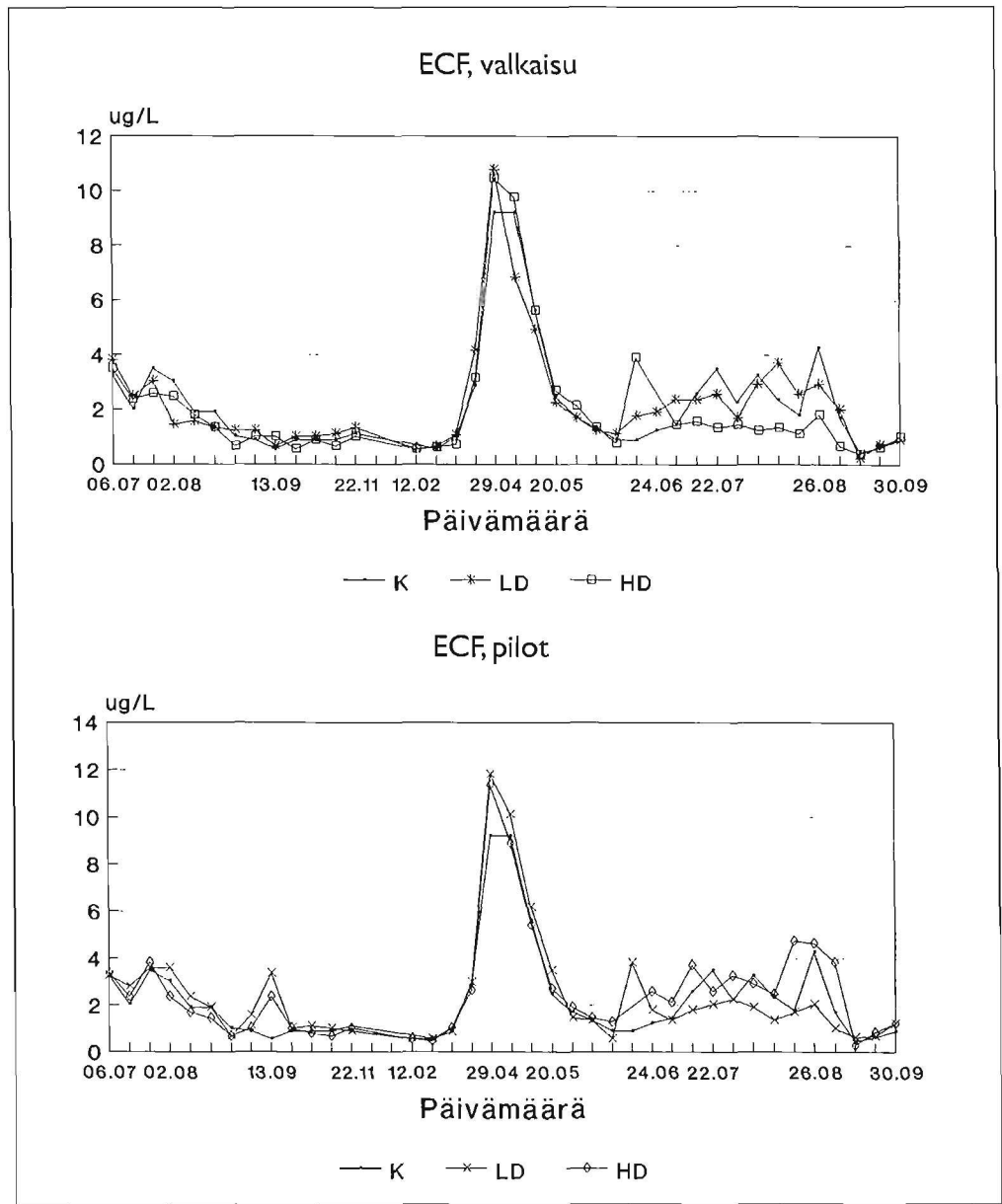
Veden klorofylli-a:n pitoisuus eri malliekosysteemialtaissa on esitetty kuvissa 5-7. Verrattaessa kokeissa käytettyä kahta kontrollia keskenään voidaan klorofylli-a:n suhteen myös todeta se ero, joka aiheutuu kontrollialteiden välisestä lämpötila-erosta vuonna 1996 (Kuva 5). Suoveden ja yhdyskuntajäteveden suhteen klorofylli-a:n pitoisuudet noudattelevat pitkälti kontrollialtaiden pitoisuuksia kuitenkin niin, että yhdyskuntajätevesi yleisesti ottaen lisäisi klorofylli-a:n pitoisuutta.



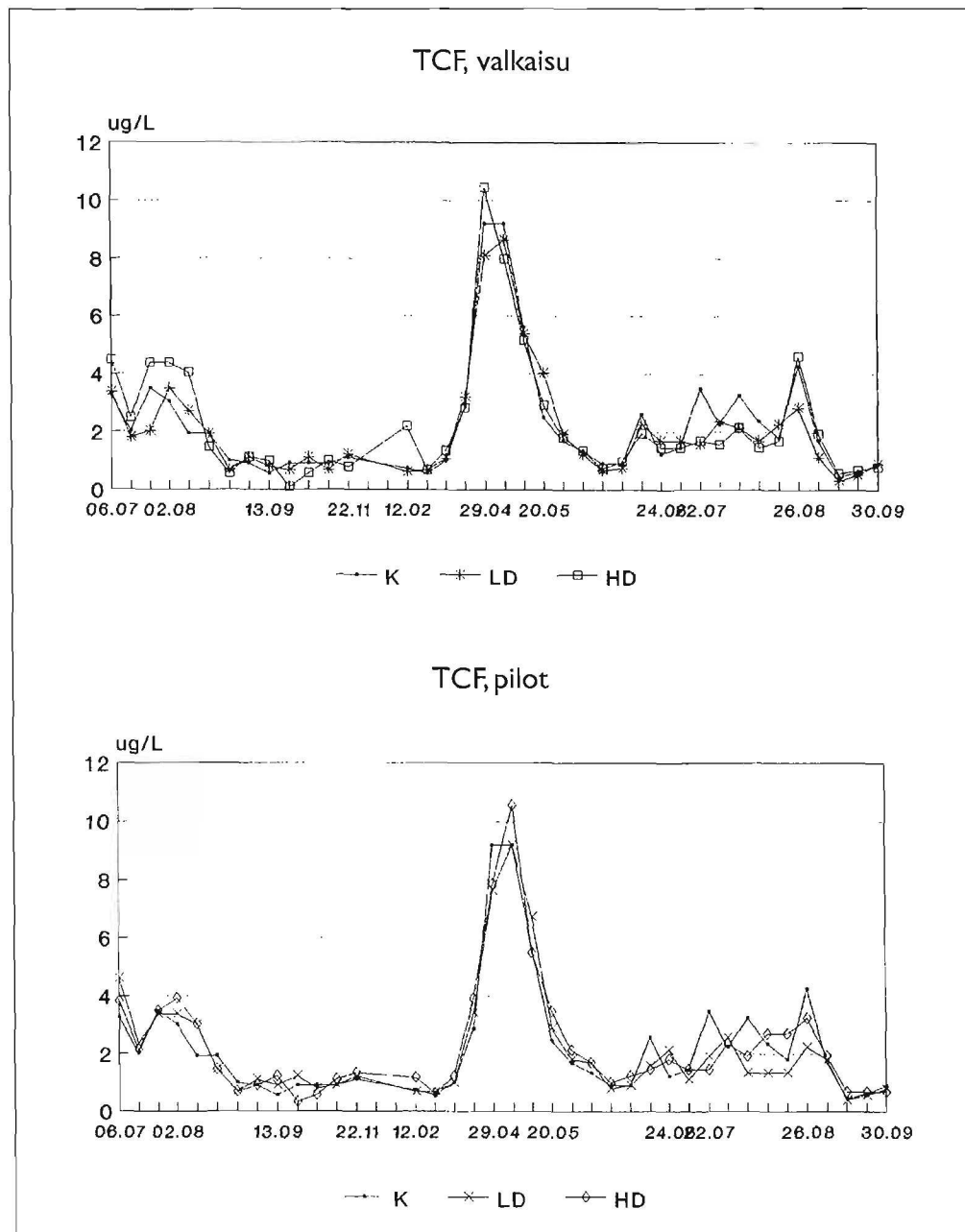
Kuva 5. Veden klorofylli-a:n pitoisuus kontrollialtaissa sekä suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistetuissa malliekosysteemialtaissa.

ECF-jätevesille altistetuissa malliekosysteemeissä (Kuva 6) klorofylli-a:n pitoisuudet olivat varsinkin käsittelemättömälle jätevedelle altistettaessa hieman alempia kuin kontrollialtaiden. Käsitellyn ECF-jäteveden osalta pienempi klorofylli-a:n pitoisuus oli merkittävämpää suuremmassa laimennuksessa. Huomattavaa on, että muutokset altistettujen ja kontrollialtaiden välillä tulivat esille vasta vuonna 1996, jolloin altistus oli jatkunut yli talven. Ensimmäisen kasvukauden aikana (kesä-syysy 1995) eroja ei syyskuussa esiintynyttä pitoisuushuippua lukuunottamatta ollut lainkaan.

TCF-jätevesille altistuneiden altaiden klorofylli-a:n pitoisuudet eivät poikenneet kontrollialtaista yhtä paljon kuin mitä ECF-jätevesille altistuneiden altaiden vastaavat pitoisuudet (Kuva 7). Erojen esiintyminenkin sattui myöhemmäksi kuin ECF-jätevesien kohdalla. Yhteistä kaikille altistuneille alueille on kuitenkin se, että ne suurimmaksi osaksi noudattivat samaa kaavaa kuin kontrollialtaat ja kaikissa altaissa esiintyi selvä keväthuippu. Tämän perusteella ainakin klorofylli-a:n suhteen dynamiikka altistetuissakin altaissa on toiminut.



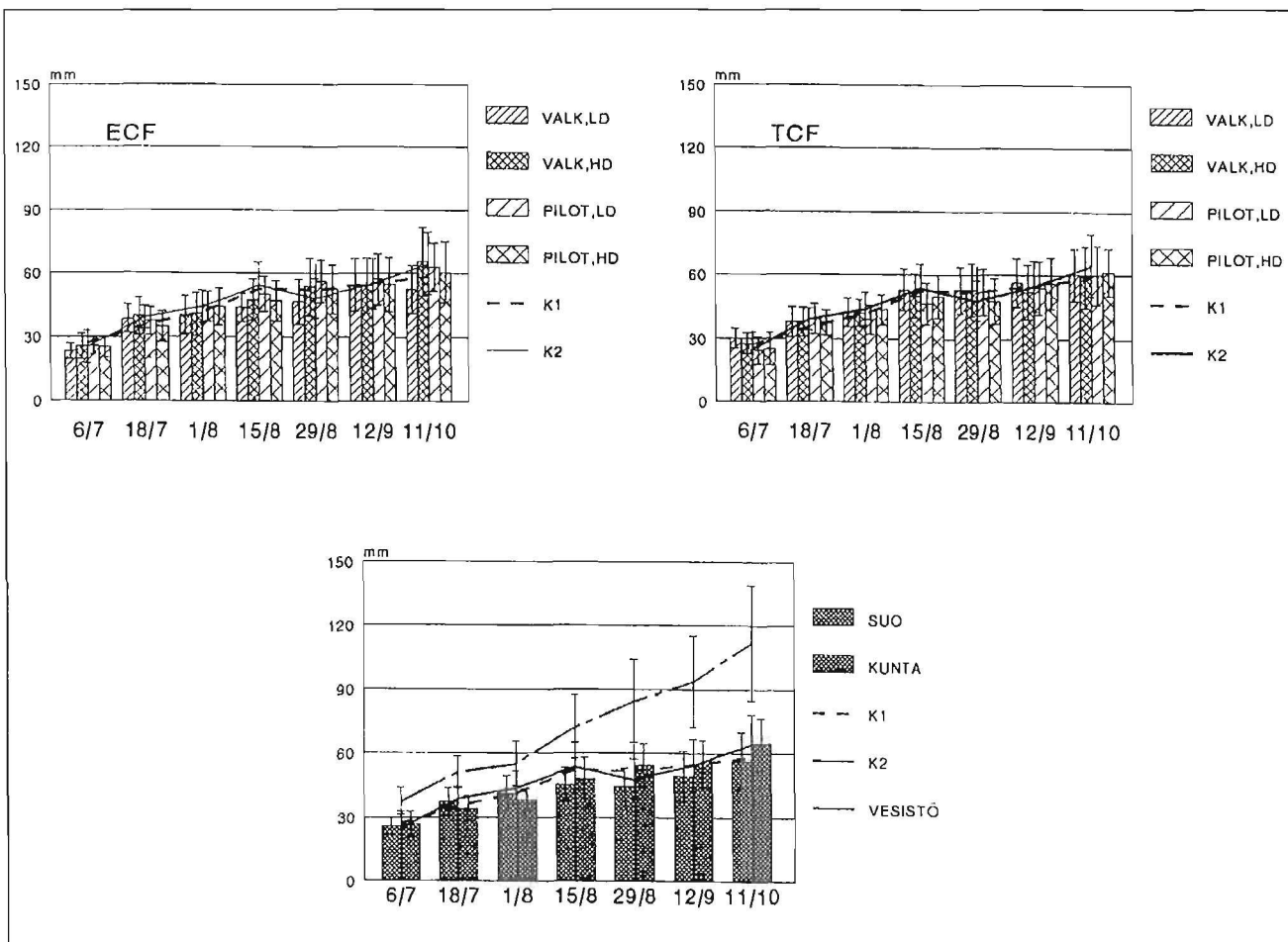
Kuva 6. Klorofylli-a:n pitoisuus ECF-jätevesille altistetuissa malliekosysteemialtaissa.



Kuva 7. Klorofylli-a:n pitoisuudet TCF-jätevesille altistetuissa malliekosysteemialtaissa.

Rakkolevän kasvussa ei vuoden 1995 kasvukauden aikana voitu todeta merkittäviä eroja eri malliekosysteemialtaiden välillä (Kuva 8). TCF-altistus alkoi vasta syyskuun alussa eikä syys-lokakuun aikana todettu muutoksia näille jätevesille altistuneiden rakkolevien kasvussa. Rakkolevän kasvun pientä hetkittäistä hidastumista on todettavissa käsittelemättömälle ECF-jätevedelle suuremmassa (ECF valk, LD) laimennuksessa altistuneessa altaassa, jossa kasvukauden lopussa rakkolevän kasvu oli muita altaita hitaampaa. Suovedelle altistuneessa altaassa oli myös havaittavissa elo-syyskuussa lievää kasvun hidastumista kontrolleihin verrattuna.

Vuoden 1996 kasvukauden aikana rakkolevän kasvu oli selvästi pienempää kuin vuonna 1995. Tämä näkyy myös vesistössä tehdyissä mittauksissa ja syynä on hyvin kylmä kesä-heinäkuu 1996. Käsittelemätön ECF-jätevesialtistus vaikutti rakkolevän kasvuun hidastavasti pienemmässä laimennuksessa (HD), mutta ei suuremmassa laimennuksessa (LD). Käsitellylle ECF-jätevedellä altistuneissa altaissa rakkolevän kasvu oli vähän kontrollia suurempaa (Kuva 9). Nämä havainnot viit-



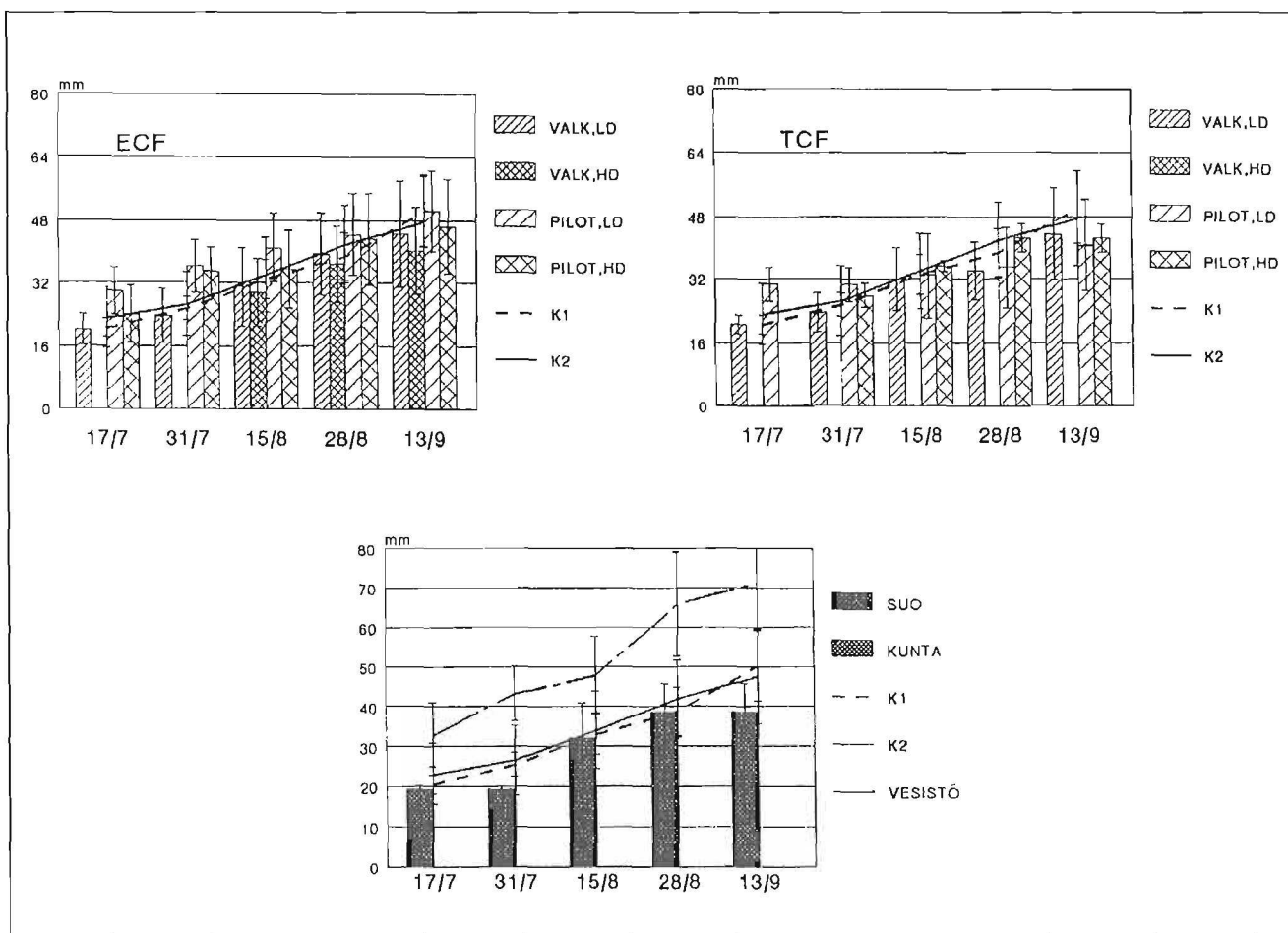
Kuva 8. Rakkolevän kasvu malliekosysteemialtaissa vuonna 1995.

taava siihen, että ECF-jätevesillä monasti havaittua kloraatti-vaikutusta ei nyt todettu. Kloraatilla on todettu olevan haitallinen vaikutus rakkolevään.

TCF-jätevesille altistuneissa altaissa rakkolevän kasvu oli pienempää kuin kontrollialtaissa ja ECF-jätevesille altistuneissa altaissa. Tämä ero oli merkittävämpi käsittelemättömän jäteveden osalta (Kuva 9). Merkittävimmän vaikutuksen rakkolevän kasvuun aiheutti kuitenkin yhdyskuntajätevesi (Kuva 9), jolle altistuneessa altaassa oli rakkolevästä vaikea löytää vuosikasvustoa lainkaan. Tämä näkyy myös kuvasta 9, jossa kuntaveden osalta ei ole esittänyt mittaustuloksia.

Rakkolevän kokonaistilavuus eri malliekosysteemialtaissa on esitetty kuvassa 10. Rakkolevän kokonaistilavuus on tulos eläinten aiheuttamasta laiduntamisesta, vuotuisesta kasvusta sekä vanhojen osien hajoamisesta. Malliekosysteemikokeiden aikana on aivan normaalia, että rakkolevän kokonaistilavuus pienenee lähtö-tilanteesta, mutta tämä pienentyminen on vaihdellut eri vuosina tehdyissä kokeissa eikä sen suhteen voida antaa mitään ohjearvoja. Nyt tehdyssä kokeessa altistus sisälsi myös talvijakson.

Tämän noin puolitoista vuotta kestäneen altistuksen päättyessä kahdessa jätevesille altistuneessa malliekosysteemialtaassa rakkolevän määrä oli selvästi kontrollialtaiden määrää pienempi. Nämä altaat altistuivat pienemmässä laimennoksessa TCF-jätevedelle (TCF,H valkaisu ja pilot) ja jäteveden käsittelyllä ei näytä olevan vaikutusta tässä tapauksessa. Sen sijaan altaissa, joita altistettiin samojen jätevesien suuremmille laimennuksille vastaavaa ilmiötä ei havaittu. Näissä altaissa samoin kuin ECF-jätevesille tai suo- ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa rakkolevän määrä oli yhtä suuri tai suurempi kuin kontrollialtaissa (Kuva 10).

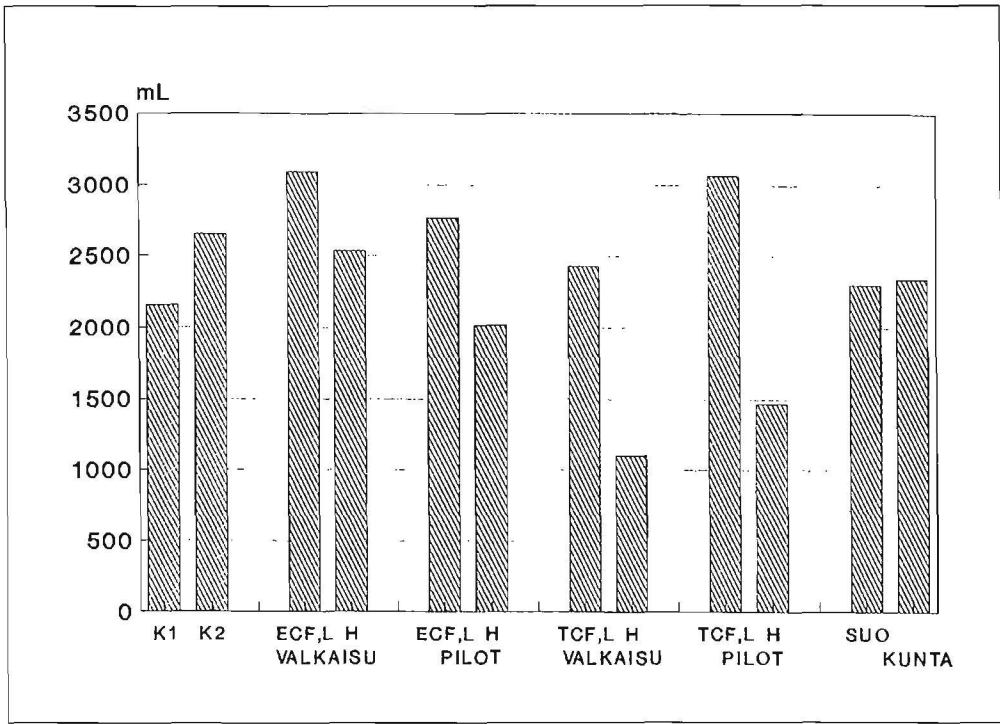


Kuva 9. Rakkolevän kasvu malliekosysteemialtaissa vuonna 1996.

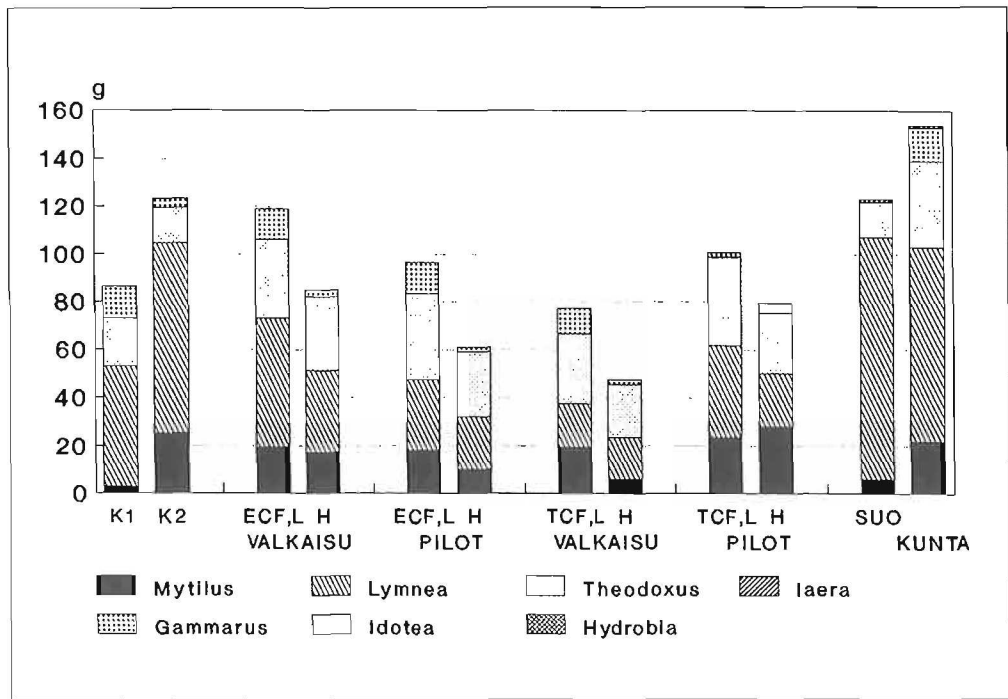
3.3.2 Vaikutukset selkärangattomiin eläimiin

Malliekosysteemialtaiden rakkoleväyhteisön selkärangattomien eläinten biomassat on esitetty kuvassa 11. Rakkoleväyhteisön hallitsevina lajeina olivat limakotilo, *Lymnaea spp* ja leväkotilo, *Theodoxus fluviatilis*. Selkärangattomien biomassa näyttää olevan suorassa suhteessa rakkolevän tilavuuteen (vrt. Kuva 10) kuitenkin sillä poikkeuksella, että suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa selkärangattomien biomassa on suurempi kuin mitä rakkolevän tilavuus antaisi olettaa (Kuva 11). Tämä viitannee suoveden ja yhtesikuntajäteveden rehevöittävään vaikutukseen siten, että eläimille on ollut runsaasti rakkolevän päällyskasvustoa ravintona käytettäväksi. Tämä näkyy toisaalta verrattaessa altaiden perifyytonin määriä (Kuva 4). Suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa perifyytonin määrä on ollut kaikkein pienentä eli kotilot ovat käyttäneet päällyskasvustoa ravintonaan. Valkaisujätevesille altistuneissa malliekosysteemialtaissa havaittava annosvasteisuus rakkoleväeliöstön biomassan suhteen johtuu enemmänkin rakkolevän tilavuudesta ko. altaissa kuin jäteveden suoranaisesta vaikutuksesta eliöyhteisöön.

Sedimentin selkärangattomien biomassat eri malliekosysteemialtaissa on esitetty kuvassa 12. Sedimentin hallitsevina lajeina ovat olleet Itämeren simpukka, *Macoma baltica*, ja sydänsimpukka, *Cardium edule*. Lisäksi suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa esiintyi limakotiloa myös sedimentissä. Tämä lajihan oli hallitseva myös rakkolevässä ko. altaissa. Käsitellyille valkaisujätevesille (pilot) altistetuissa altaissa sedimentin selkärangattomien biomassat olivat samal-

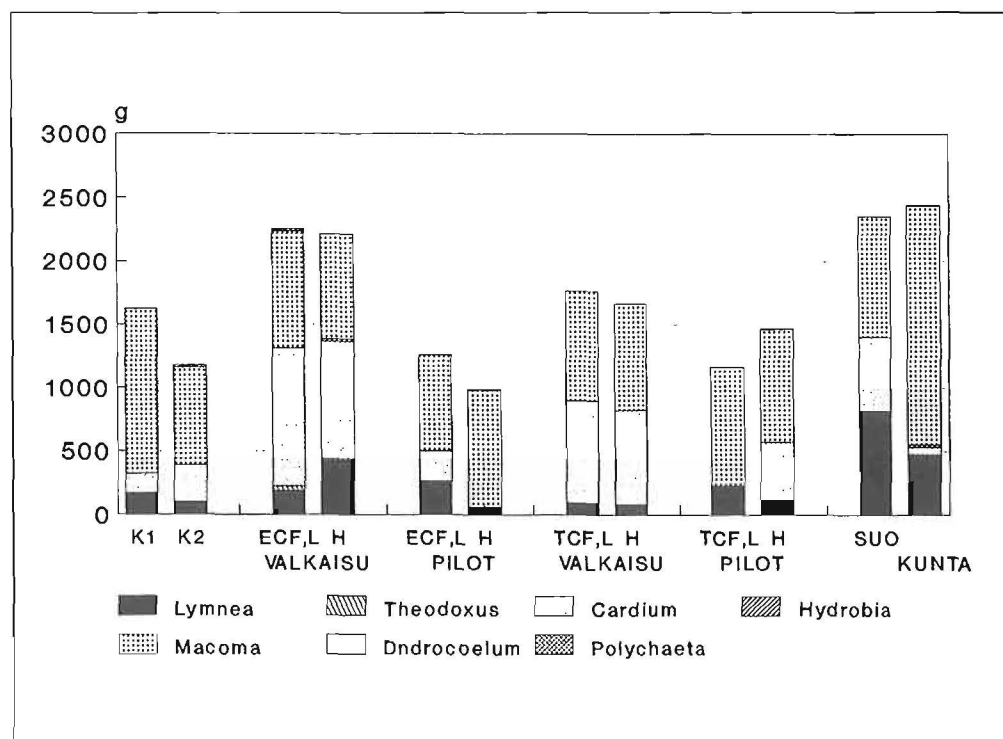


Kuva 10. Rakkolevän kokonaistilavuus eri malliekosysteemialtaissa kokeiden lopussa syksyllä 1996.



Kuva 11. Rakkolevässä elävien selkärangattomien biomassa malliekosysteemialtaissa altistuksen päättyessä

la tasolla kuin kontrollialtaissa. Sen sijaan käsittelemättömille valkaisu-jätevesille (valkaisu) altistuneiden altaiden sedimentin selkärangattomien biomassa olivat kontrollialtaiden vastaavia suuremmat. Tämä viittaisi näiden vesien osalta rehevöittäväan vaikutukseen, joka toisaalta on selvästi nähtävissä suoveden ja yhdyskuntajäteveden altistamissa altaissa, joissa myös rakkolevän eliöyhteisön biomassa olivat kontroleita suuremmat.



Kuva 12. Sedimentin selkärangattomien biomassat malliekosysteemialtaissa altistuksen päättyessä.

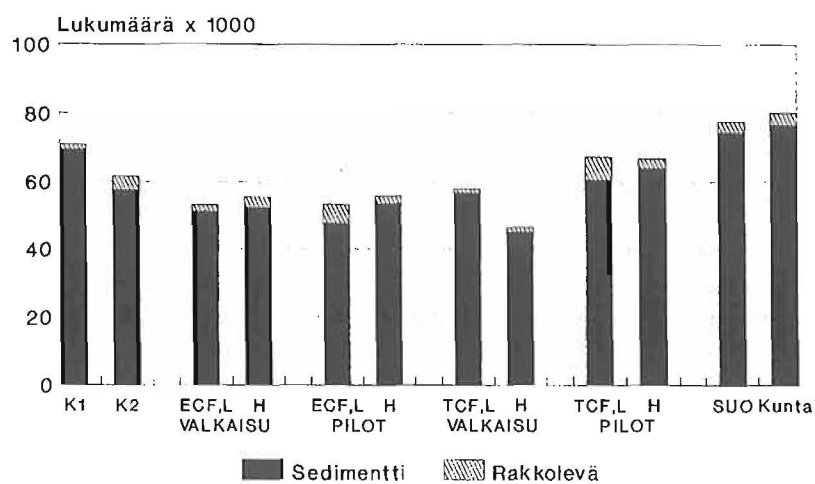
Valkaisujätevesillä, käsittelystä riippumatta, ei ollut vaikutusta malliekosysteemialtaiden selkärangattomien kokonaismäärään, kun määriä verrataan kontrollialtaiden vastaaviin arvoihin (Kuva 13). Suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa malli-ekosysteemialtaissa selkärangattomien kokonaismäärä sen sijaan oli kontrollialtaita suurempi, johtuen nimenomaan sedimentin muita altaita suuremmasta yksilömäärästä. Kaikissa altaissa sedimentin eliömäärä oli suurempi kuin vastaava rakkolevän yksilömäärä.

Selkärangattomien kokonaisbiomassan suhteen kuva on samanlainen kuin sedimentin selkärangattomien biomassan suhteen, koska niiden osuus on kaikissa altaissa hallitseva (Kuva 13).

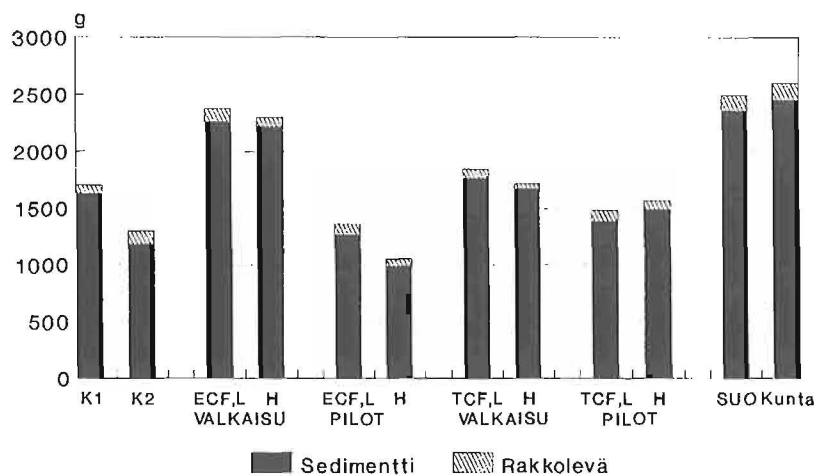
Tutkimusten yhteydessä seurattiin myös sinisimpukan, *Mytilus edulis*, kasvua eri malli-ekosysteemialtaissa. Sinisimpukat oli sijoitettu erillisiin verkkoseinäisiin muovilaatikoihin ja laatikot oli ripustettu roikkumaan lähelle sisääntuloveden kohtaa.

Vuoden 1995 kasvukauden aikana sinisimpukan kasvussa ei todettu altistuksesta aiheutuvia vaikutuksia. Valkaisujätevesille, suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa simpukan kasvu oli samanaista kuin kontrollialtaissa (Kuva 14).

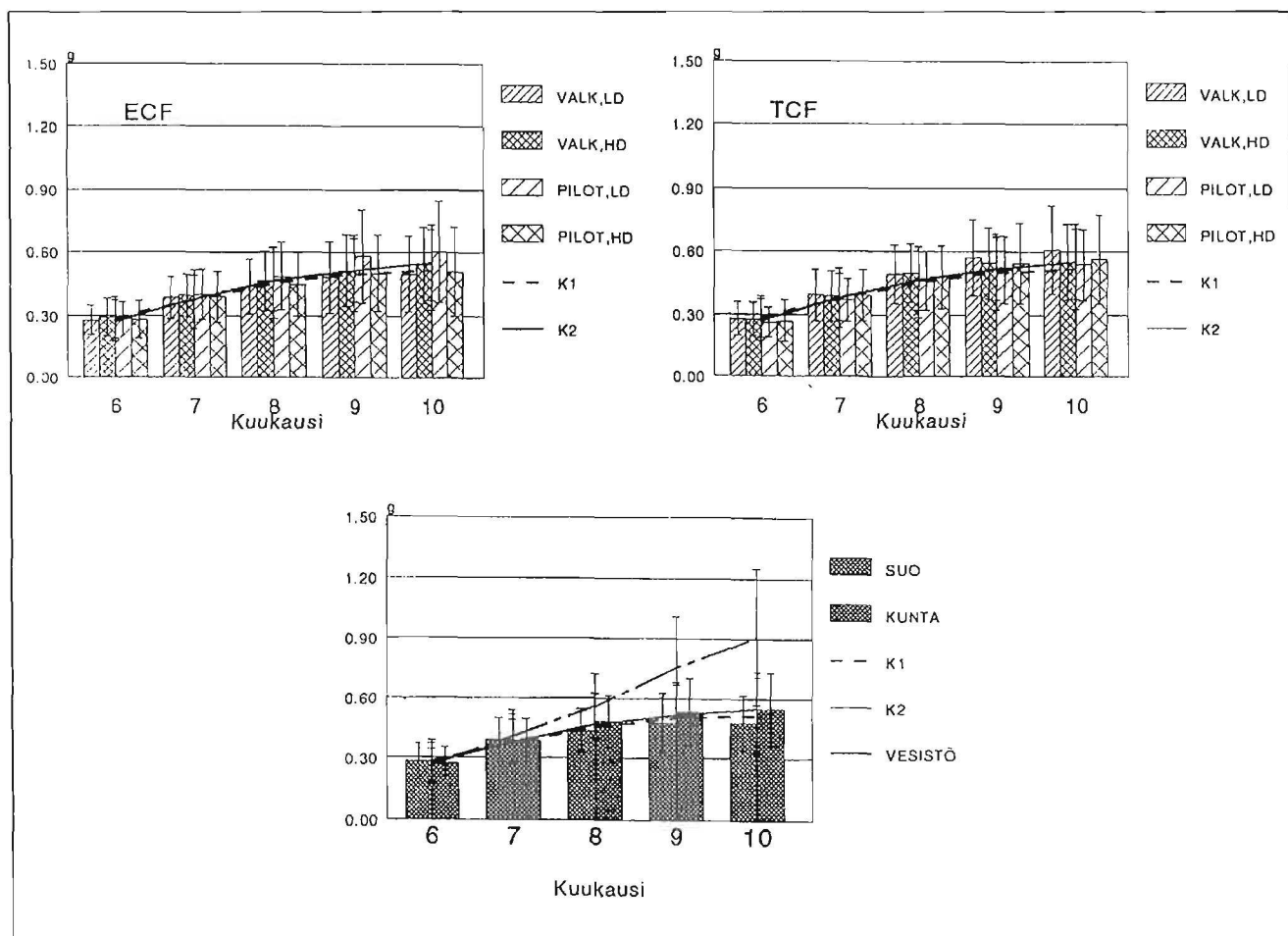
Eläinyhteisö, lukumäärä
Sedimentti + rakkolevä



Eläinyhteisö, kokonaisbiomassa
Sedimentti + rakkolevä

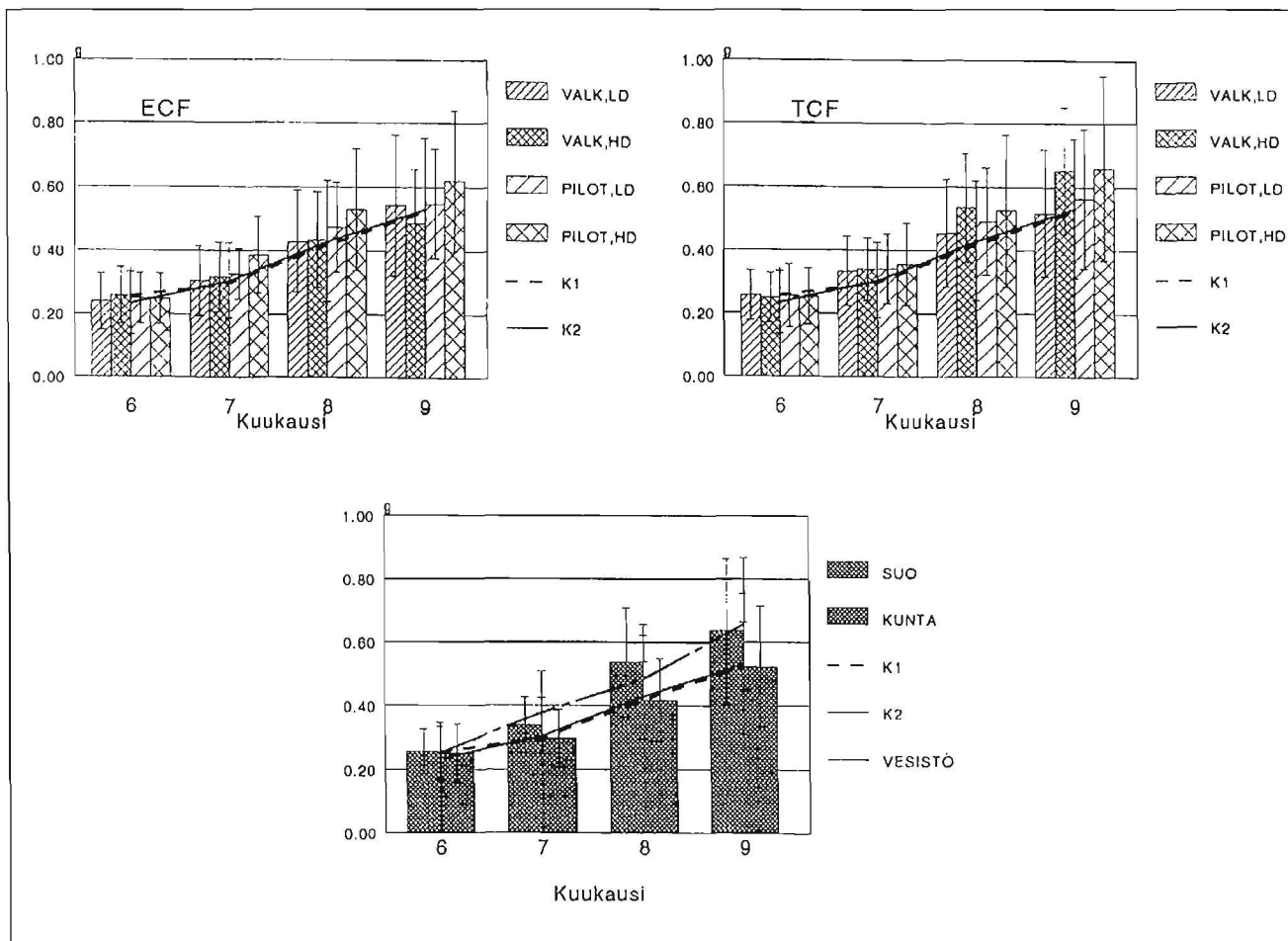


Kuva 13. Malliekosysteemialtaiden selkärangattomien kokonaismäärä ja -biomassa altistusten lopussa.



Kuva 14. Sinisimpukan kasvu eri malliekosysteemeissä vuonna 1995

Talven 1996 aikana altaiden seinämiin kertyi niin paljon jäätä, että simpukka-laatikot jäivät jään sisään ja simpukat kuolivat talven aikana. Kesällä 1996 altaisiin laitettiin uudet simpukat ja niiden kasvu on esitetty kuvassa 15. Vuoden 1996 aikana ECF-jätevesille altistuneiden simpukoiden kasvu oli samanlaista kuin kontrollialtaiden simpukoiden. TCF-jätevesille ja suovedelle altistuneet simpukat kasvoivat hiemen enemmän kuin kontrollialtaissa, mutta yhdyskuntajätevedellä ei 1995 ja 1996 todettu vaikutusta simpukan kasvuun. .

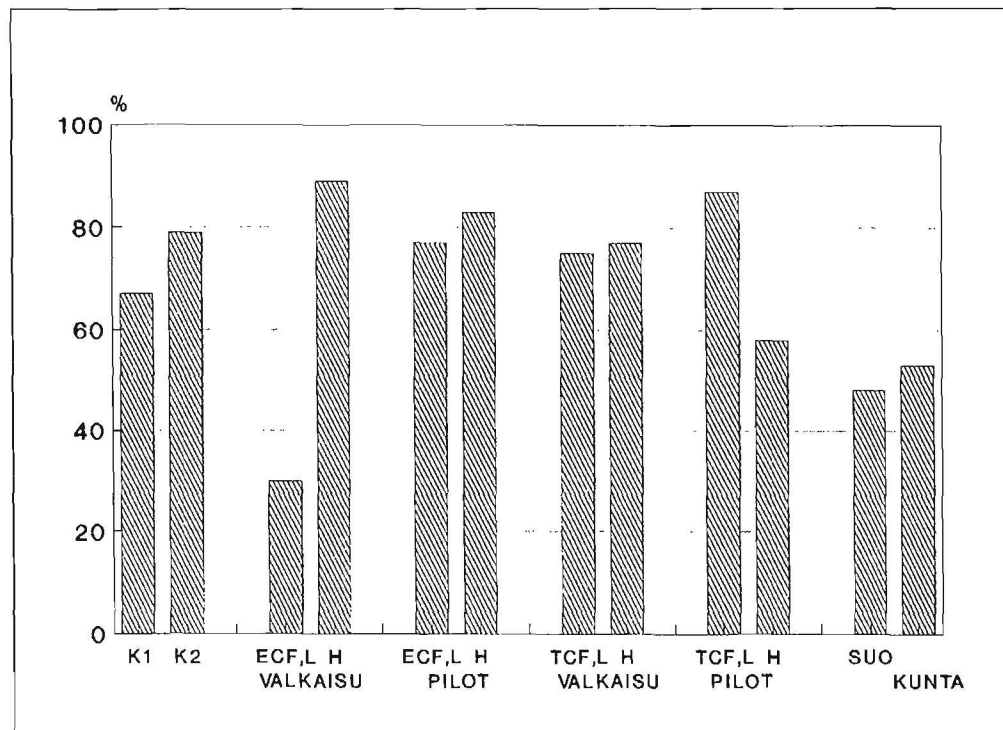


Kuva 15. Sinisimpukan kasvu eri malliekosysteemialtaissa vuonna 1996

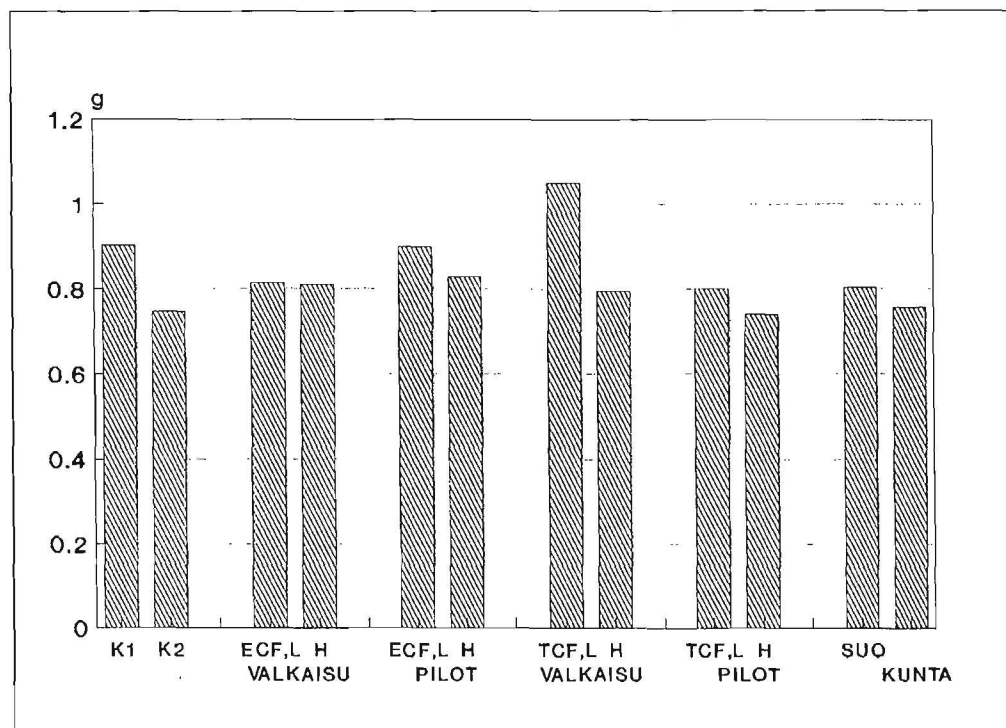
3.3.3 Vaikutukset kaloihin

Kokeiden alussa, alkukesällä 1995, kuhunkin malliekosysteemialtaaseen laitettiin 80 kpl kolmipiikin vastakuoriutuneita poikasia. Poikaset pyydettiin tutkimusase-
man edustalla olevasta lahdesta ja niiden keskipaino oli 17,5 mg. Talven jälkeen
alkukesällä 1996 malliekosysteemialtaita tarkasteltaessa todettiin, että edellisenä
vuonna altaisiin laitettut kolmipiikin poikaset olivat talven aikana saavuttaneet su-
kukypsyyden ja lisääntyneet. Tästä syystä syksyllä 1996 kokeiden päättyessä altais-
sa oli kahta eri kokoluokkaa olevia kolmipiikkejä.

Vuoden 1995 poikasten kuolleisuus on esitetty kuvassa 16. Jätevesialtistus sa-
moin kuin altistus suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle ei lisännyt kolmipiikkien
kuolleisuutta. Aikaisemmissa malliekosysteemitutkimuksissa kolmipiikkien kuollei-
suus kontrolli- altaissa yhden kasvukauden jälkeen on vaihdellut 25 ja 70 % välillä
vuorovuosittain (Lehtinen ym. 1995). Tässä tutkimuksessa altistus jatkui yli talven
kahden kasvukauden ajan, joten nyt todettua kuolleisuutta ei voida pitää poikke-
uksellisen korkeana.



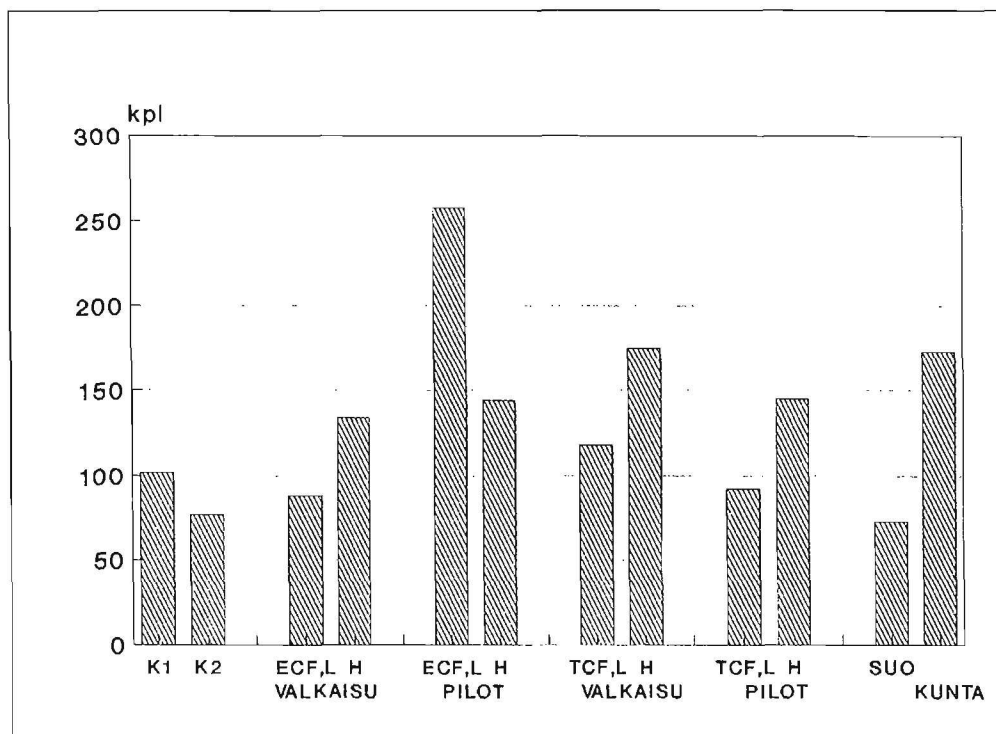
Kuva 16. Malliekosysteemi-altaiin kokeiden alussa (1995) laitettujen kolmipiikkien kuolleisuus kokeiden aikana



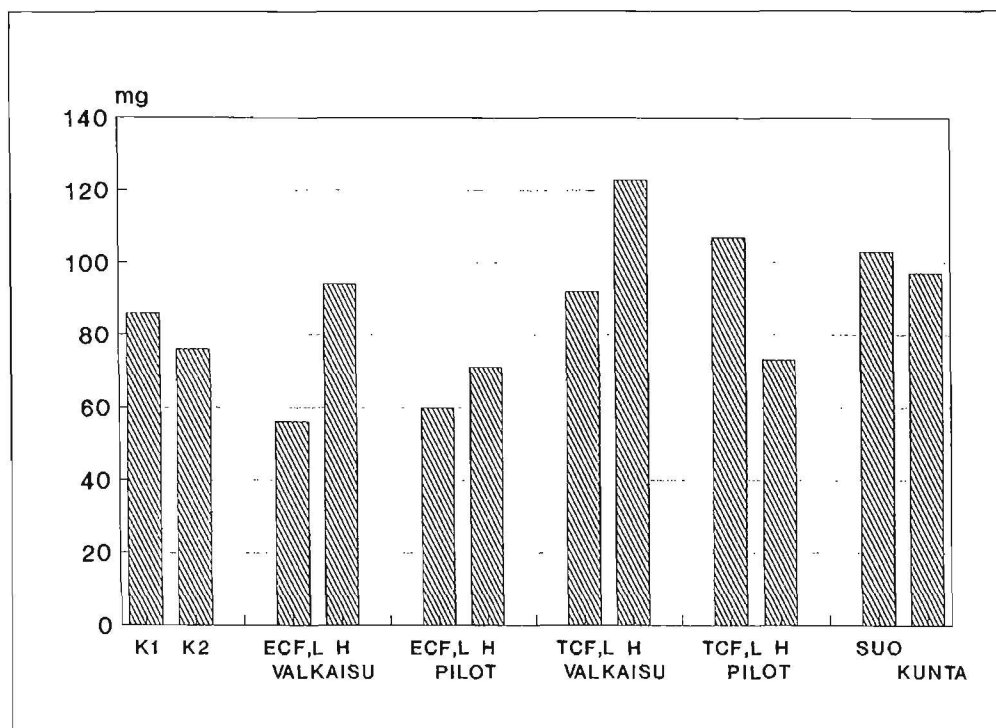
Kuva 17. Kolmipiikin vuoden 1995 poikasten keskipaino (g) eri malliekosysteemi-altaiissa kokeiden lopussa syksyllä 1996

Eri altaissa olleiden vuoden 1995 poikasten keskipainot olivat samaa suuruusluokkaa (Kuva 17), joten jätevesialtistuksella ei tässä tutkimuksessa ole ollut vaikutusta kolmipiikin kasvuun..

Vuoden 1996 poikasia esiintyi kaikissa altaissa (Kuva 18) osoituksena siitä, että lisääntyminen oli onnistunut jätevesialtistuksesta huolimatta. Valkaisujätevesille



Kuva 18. Vuoden 1996 kolmipäikkipoikasten lukumäärä eri malliekosysteemialtaissa altistuksen lopussa.



Kuva 19. Vuoden 1996 kolmipäikkipoikasten keskipaino eri malliekosysteemialtaissa altistuksen lopussa.

altistuneissa altaissa poikasia esiintyi jopa enemmän kuin kontrollialtaissa. Vuoden 1996 poikasten keskipaino on esitetty kuvassa 19. Poikasten keskipaino oli hieman suurempi TCF-jätevesille sekä suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa kontrollialtaisiin verrattuna. ECF-jätevedelle altistuneissa altaissa vuonna 1996 syntyneiden poikasten koko oli yleisesti ottaen kontrollialtaiden poikasia pienempi.

3.4 Toiminnalliset vaikutukset

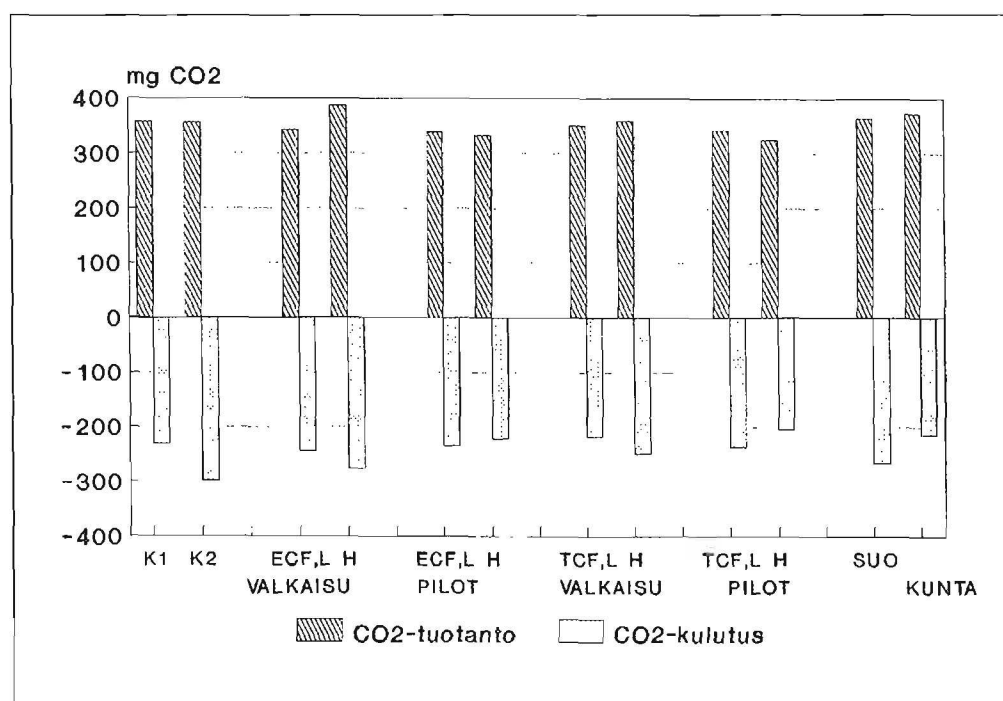
3.4.1 Perustuotanto

Kasvien tehtävänä ekosysteemeissä on kuluttaa hiilidioksidia ja tuottaa happea. Ekosysteemiä, jossa kasvit tuottavat happea nettona sekä kuluttavat eliöstön tuottaman hiilidioksidin, kutsutaan autotrofiseksi. Sen sijaan systeemi, joka kuluttaa enemmän happea ja tuottaa enemmän hiilidioksidia kuin mitä autotrofiset kasvit pystyvät kuluttamaan, on heterotrofinen ts. riippuvainen ulkopuolisesta energiasta ja hapesta.

Malliekosysteemialtaan hapen kokonaistuotanto kuvaa sisääntulevan veden mukana tulleen hapen, altaissa fotosynteesin tuottaman hapen ja eläinten ja kasvien kuluttaman hapen, ilmakehään poistuneen hapen ja ulosmenevän veden mukana poistuneen hapen välistä eroa. Hiilidioksidin kokonaiskulutus puolestaan muodostuu sisääntulevan veden mukana tulleen hiilidioksidin, kasvien ja eliöstön tuottaman hiilidioksidin sekä kasvien kuluttaman hiilidioksidin sekä ilmakehään ja poistoveden mukana kulkeutuneen hiilidioksidin määrästä.

Malliekosysteemien perustuotanto esitetään tuotetun ja kulutetun hiilidioksidin (CO_2) määränä. Hiilidioksidin tuotto kuvaa systeemin hengitystä. Tuotetun ja kulutetun hiilidioksidimäärien avulla saadaan luotettavampi kuva malliekosysteemien perustuotannosta kuin käyttämällä vastaavia happimääriä. Esimerkiksi kuuminä päivinä altaissa tuotettua happea poistuu systeemistä kuplina jota ei saada mukaan mittauksiin.

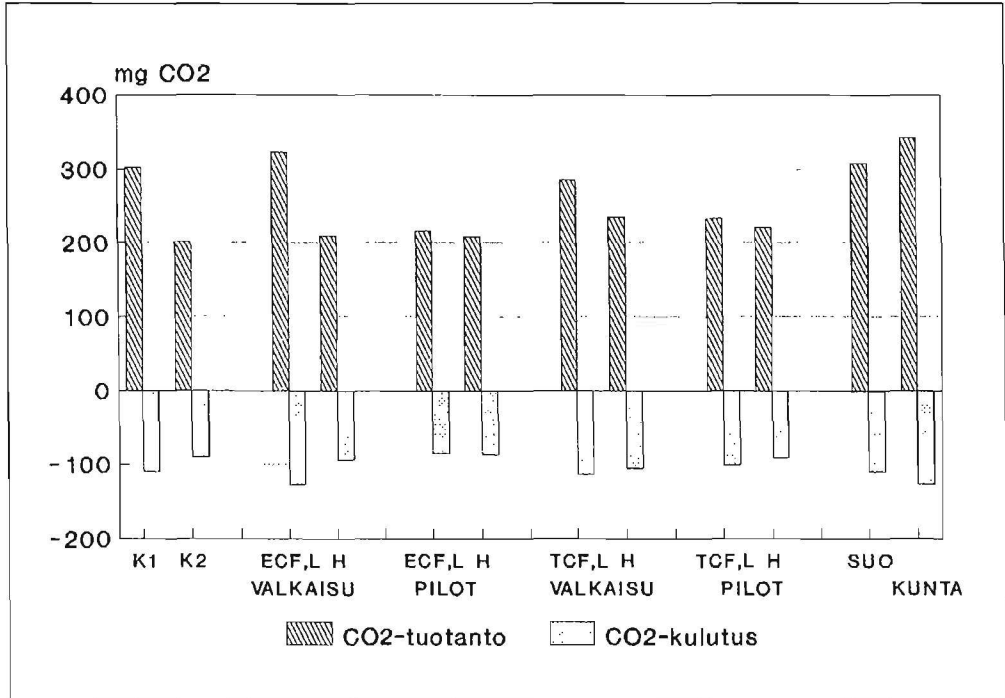
Kuvassa 20 on esitetty hiilidioksidin kokonaistuotto (hengitys) vuoden 1995 mittausten perusteella. Vuonna 1995 oli kummankin kontrollin tuottama hiilidioksidimäärä yhtä suurta. Altistuneiden malliekosysteemialtaiden hiilidioksidin tuotannossa ei vuonna 1995 havaittu merkittävämpiä eroja kontroleihin verrattuna. Erot altistuneiden ja kontrollialtaiden välillä olivat alle 10 %.



Kuva 20. Hiilidioksidin kokonaistuotto (hengitys) ja kulutus malliekosysteemialtaissa vuoden 1995 mittausten perusteella.

Hiilidioksidin kulutus (Kuva 20) oli kummassakin kontrollialtaassa sama vuonna 1995. Vuonna 1995 kontrollialtaita pienempää hiilidioksidin kulutusta havaittiin TCF-jätevesille (TCF-valkaisu,LD ja TCF-pilot,HD) sekä käsitellylle yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa. Kontrollialtaita suurempi hiilidioksidin kokonaiskulutus vuonna 1995 todettiin käsittelemättömälle ECF-jätevedelle ja suovedelle altistuneissa altaissa.

Hiilidioksidin tuotanto eli malliekosysteemien hengitys oli vuonna 1996 (Kuva 21) lähes kaikissa altaissa suurempaa kuin vuonna 1995. Kontrollialtaiden CO₂-tuotannossa voitiin havaita eroa vuonna 1996. Valkaisujätevesille altistuneiden malliekosysteemien CO₂-tuotanto oli yhtä poikkeusta lukuunottamatta (ECF-valkaisu, LD) kontrollia pienempää. Suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa malliekosysteemeissä hiilidioksidin tuotanto oli sensijaan kontrollia suurempaa. Vastaavasti hiilidioksidin kulutus on valkaisujätevesille altistuneissa malliekosysteemeissä ollut kontrollia pienempää, mutta suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa kontrollia suurempaa.

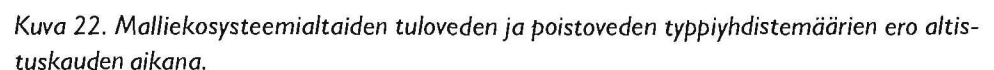


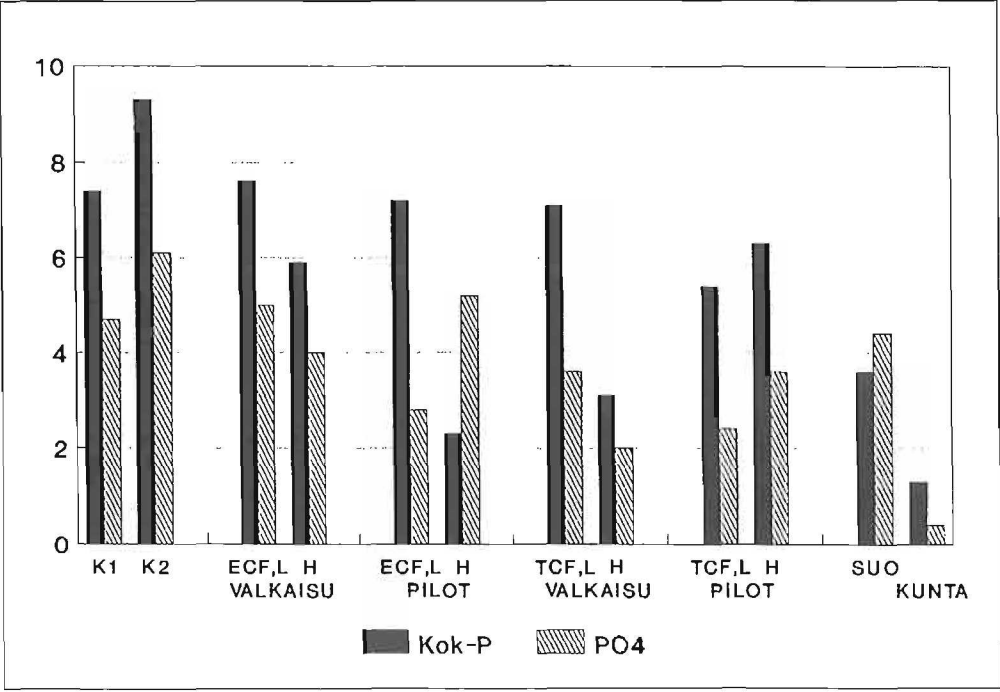
Kuva 21. Hiilidioksidin kokonaistuotanto ja kulutus malliekosysteemialtaissa vuoden 1996 mittauksen perusteella.

3.4.2 Ravinnesuolat ja orgaaninen hiili

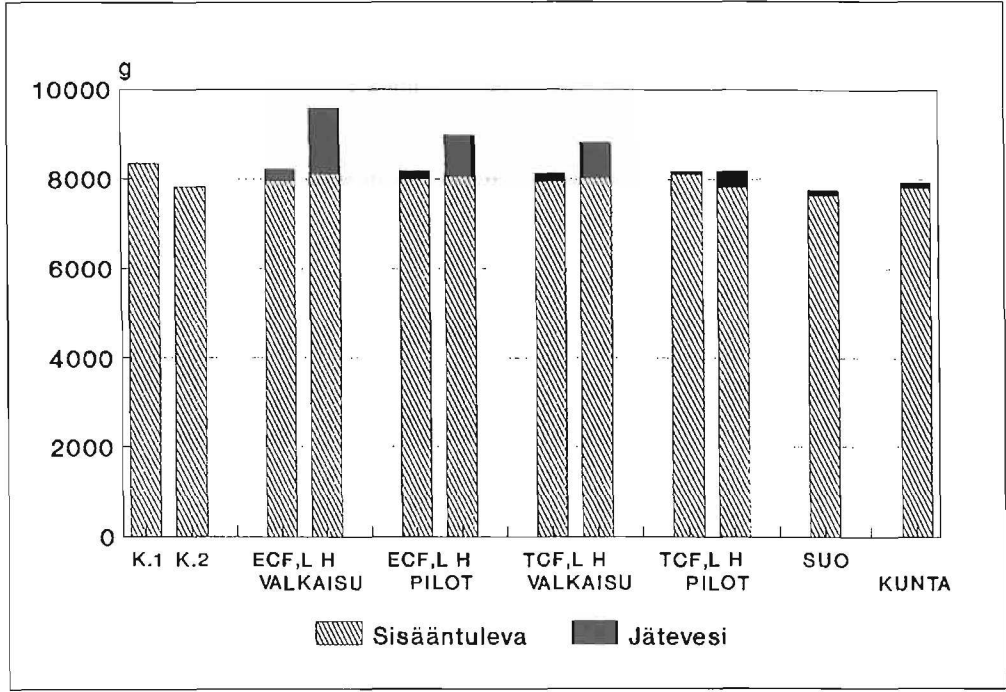
Tase sisääntulevan ja ulosmenevän typen osalta on esitetty kuvassa 22. Merkittävimmät erot kontrollialtaisiin nähden on todettavissa yhdyskuntajätevedelle altistetussa altaassa. Kuvan pylväät kuvaavat sisääntulevan murtoveden ja altaisiin pumpattujen jätevesien mukanaan tuomien ja toisaalta altaista ulosmenevän veden mukana poistuvien ainemäärien välistä eroa. Nämä taseet on laskettu syksystä 1995 altistusjakson loppuun. Toisin sanoen esim. kontrolli K1:n osalta sisääntulleen ja ulosmenneen veden kokonaistyyppimäärän ero on 76 g, jonka voidaan katsoa jääneen altaaseen kun mukaan on myös huomioitu altaan oma tuotanto ja kulutus.

Eri altaisiin tulleen orgaanisen hiilen (TOC) määrät koko altistusjakson aikana on esitetty kuvassa 24. Kuvassa on erotettu murtoveden mukana sekä tutkittujen jätevesien mukana tulleet orgaanisen hiilen määrät. Kokeiden alussa tavoitteena oli, että suovesi- ja yhdyskuntajätevesialtistukset olisivat vertailukelpoisia annostellun hiilimäärän suhteen. Tämä tavoite onnistuttiin täyttämään, joskin se tarkoitti, että yhdyskuntajätevettä annosteltiin pienemmässä laimennuksessa kuin suovettä ja valkaisu-jätevesiä (Taulukko 5).





Kuva 23. Malliekosysteemialtaiden tuloveden ja poistoveden mukana kulkeutuneiden fosforiyhdistemäärien ero.



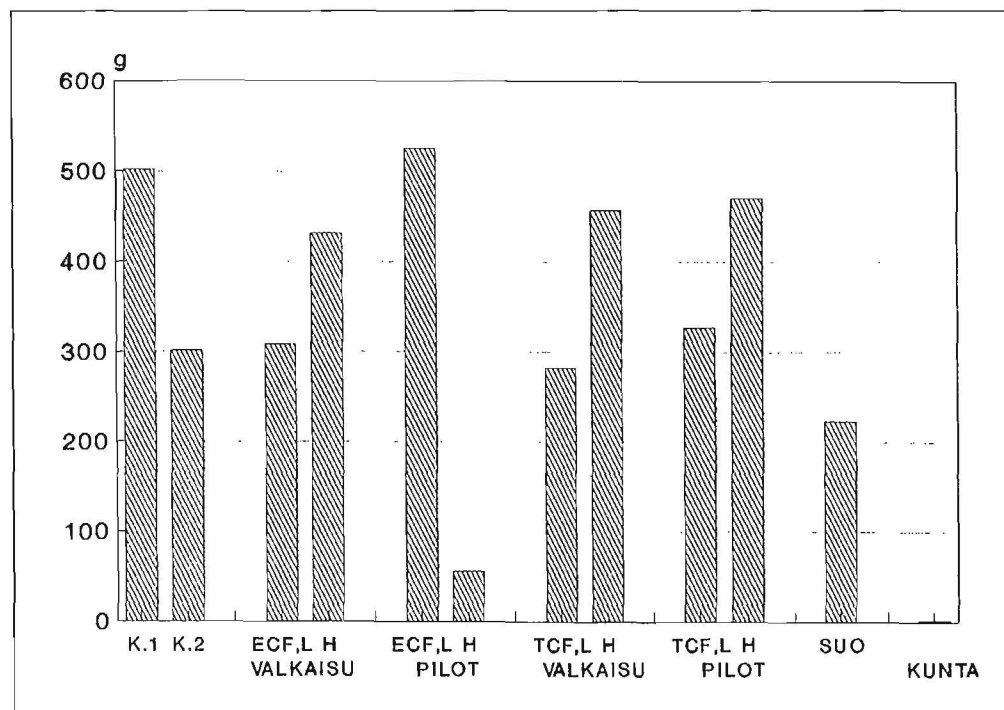
Kuva 24. Eri malliekosysteemialtaisiin tulleen orgaanisen hiilen (TOC) määrä koko altistusjakson aikana.

Altaisiin tulleen hiilen määrän suhteen suovesi- ja yhdyskuntajätevesialistukset olivat vertilukelpoisia suuremmassa laimennuksessa (LD) tapahtuneen valkaisu-jätevesialistuksen kanssa. Pienemmissä laimennuksissa (HD) jätevesien mukana tulleen hiilen (TOC) määrä oli suurempi. TCF-jätevesien mukana annostellun hiilen määrä oli ECF-jätevesien mukana tullutta hiilen määrää pienempi ja kummankin valkaisuveden osalta käsitellyt jätevedet kuormittavat vähemmän.

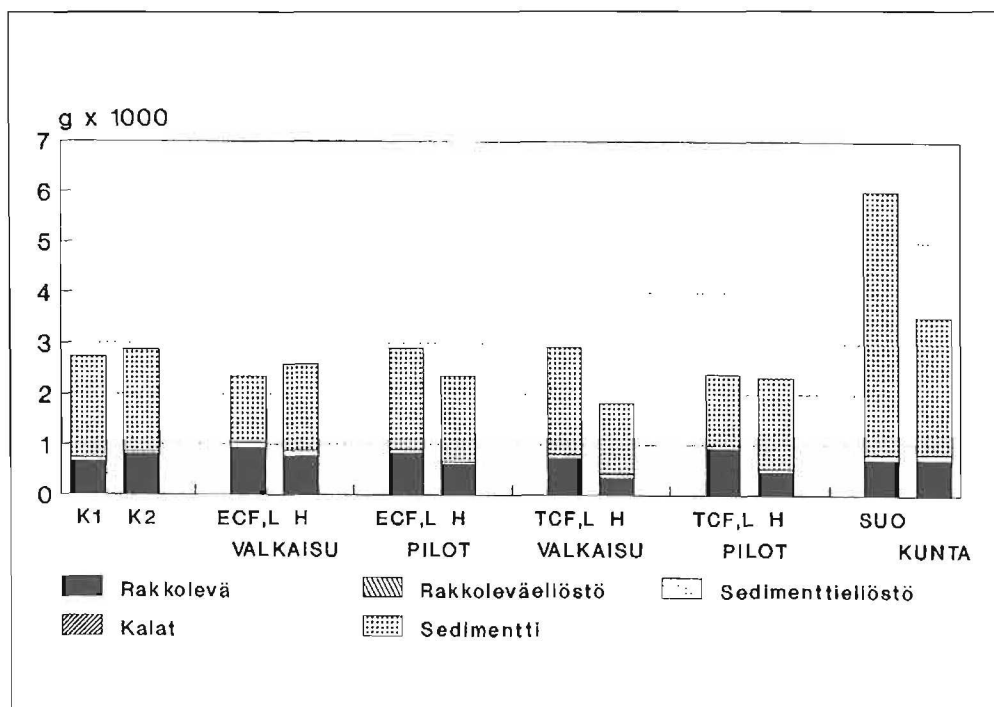
Malliekosysteemialtaisiin sisääntulleeseen ja altaista lähteneen kokonaishiilimäärän välinen ero on esitetty kuvassa 25. Tässäkin tapauksessa kuten myös ravinteiden osalta (kuvat 22, 23) kontrolliin verrattuna suurempi luku osoittaa, että altaassa oleva systeemi on pystynyt pidättämään itsessään enemmän hiiltä. Pienempi luku puolestaan tarkoittaa, että altaissa oleva systeemi ei ole pystynyt hyödyntämään altaisiin tullutta tai siellä tuotettua hiiltä. Hiiltä on poistunut altaasta suhteessa sisääntulevan veden mukana tulleeseen ainemäärään, huomioiden altaan oma tuotanto ja kulutus.

Yhdyskuntajätevedelle altistuneessa altaassa sisääntulevan ja ulosmenevän veden mukana kulkeutuneen hiilimäärän välinen ero on lähes 0. Tämä entisestään lisää sitä kuvaa, että yhdyskuntajätevedelle altistunut systeemi ei toisen kasvukauden (1996) aikana ole pystynyt hyödyntämään altaaseen tullutta tai siellä tuotettuja ainesmääriä siinä määrin kuin niitä olisi ollut käytettävissä. Suoveden osalta samoin kuin ECF-pilot HD:n osalta systeemeihin on pidättynyt selvästi vähemmän hiiltä kuin kontrolleihin tai muihin altaisiin. TCF-jätevesien osalta tilanne on hyvin samanlainen käsittelystä huolimatta. Käsitelty ECF-jätevesi poikkeaa muista tutkituista valkaisu-jätevesistä.

Malliekosysteemialtaiden orgaanisen hiilen jakautuminen systeemin eri osiin on esitetty kuvassa 26. Sedimentin orgaaninen aines kuvaa hyvin systeemin kykyä sitoa itseensä hiiltä altistuksen aikana, koska malliekosysteemikokeiden alussa sedimentti ei sisällä orgaanista ainesta. Suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistu-



Kuva 25. Malliekosysteemialtaisiin tuloveden ja poistoveden mukana kulkeutuneen orgaanisen hiilimäärän ero koko altistusjakson aikana.

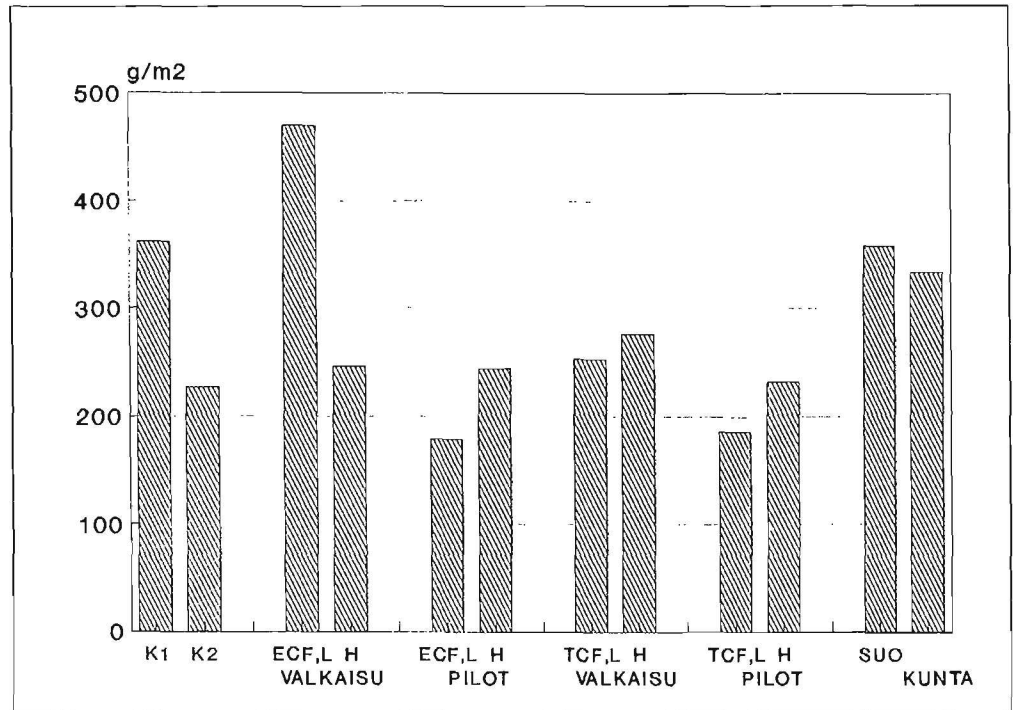


Kuva 26. Orgaanisen hiilen jakautuminen malliekosysteemialtaiden eri osissa altistuksen päättyessä.

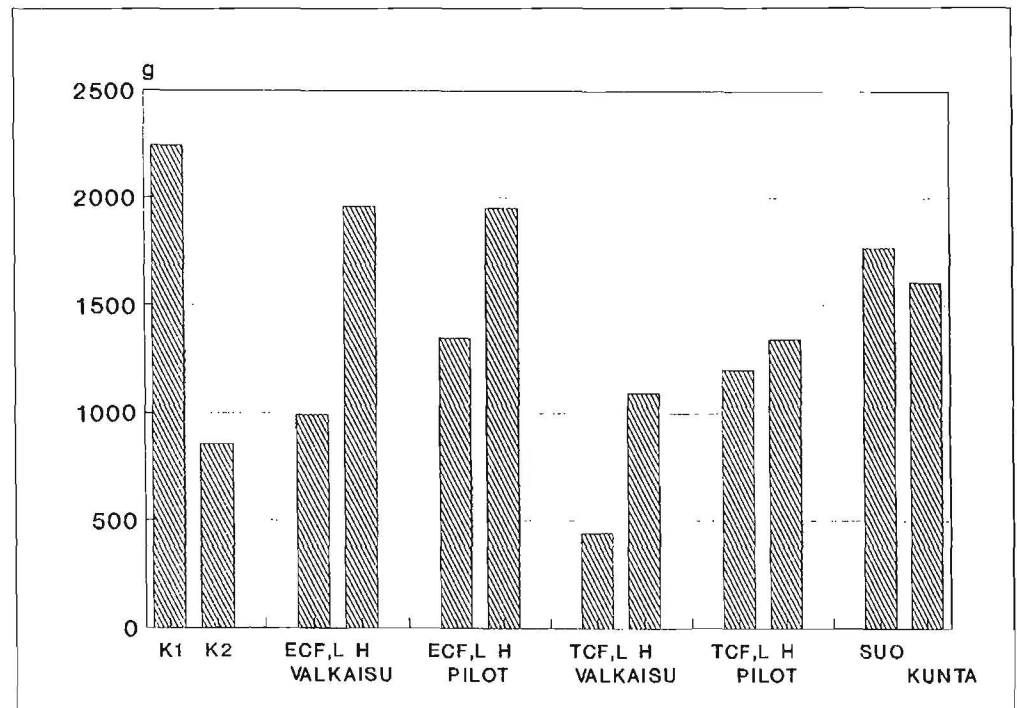
neiden altaiden sedimentti sisälsi altistuksen lopussa selvästi enemmän orgaanista ainesta kuin kontrollialtaiden sedimentit. Jätevesille altistuneissa altaissa sedimentin orgaanista ainesta oli vähemmän kuin kontrollialtaissa. Tämä tulos on samanlainen kuin aikaisemmissakin metsäteollisuuden jätevesillä tehdyissä malliekosysteemitutkimuksissa (Lehtinen ym. 1993). Vastaavaa tilannetta ei esiinny rehevöitymisessä, jossa systeemiin lisätään ravinteita ja orgaanista ainesta. Suovedellä ja yhdyskuntajätevedellä voidaan tässäkin suhteessa katsoa olleen rehevöittävä vaikutus. Rakkolevän orgaanisen hiilen määrä kuvastaa hyvin rakkolevan tilavuutta eri altaissa.

Sedimentaatio altistuneissa malliekosysteemialtaissa on ollut vähäisempää kontrollialtaisiin verrattuna (Kuva 27). Poikkeuksen muodostaa ECF-valkaisu LD, jossa on ollut muita altaita selvästi suurempi sedimentaatio koko 1,5 vuoden altistusjakson aikana. Suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneissa altaissa sedimentaatio on ollut samanlaista kuin kontrollialtaassa K1 ja suurempaa kuin valkaisujätevesille altistuneissa altaissa.

Altistuneiden malliekosysteemialtaiden kyky pidättää partikkelimaista orgaanista ainesta (POM) oli yleisesti ottaen pienempi kuin kontrollialtaiden (Kuva 28). Kahden lämpötilaltaan erilaisen kontrollin välinen ero on nähtävissä tämänkin tutkitun muuttujan osalta. Kun verrataan K2:ta ECF-valkaisu LD:hen ja TCF-pilot HD:hen, jotka lämpötilaltaan olivat samanlaisia, ei altistus aiheuttanut POM:n pidätyskyvyn heikentymistä.



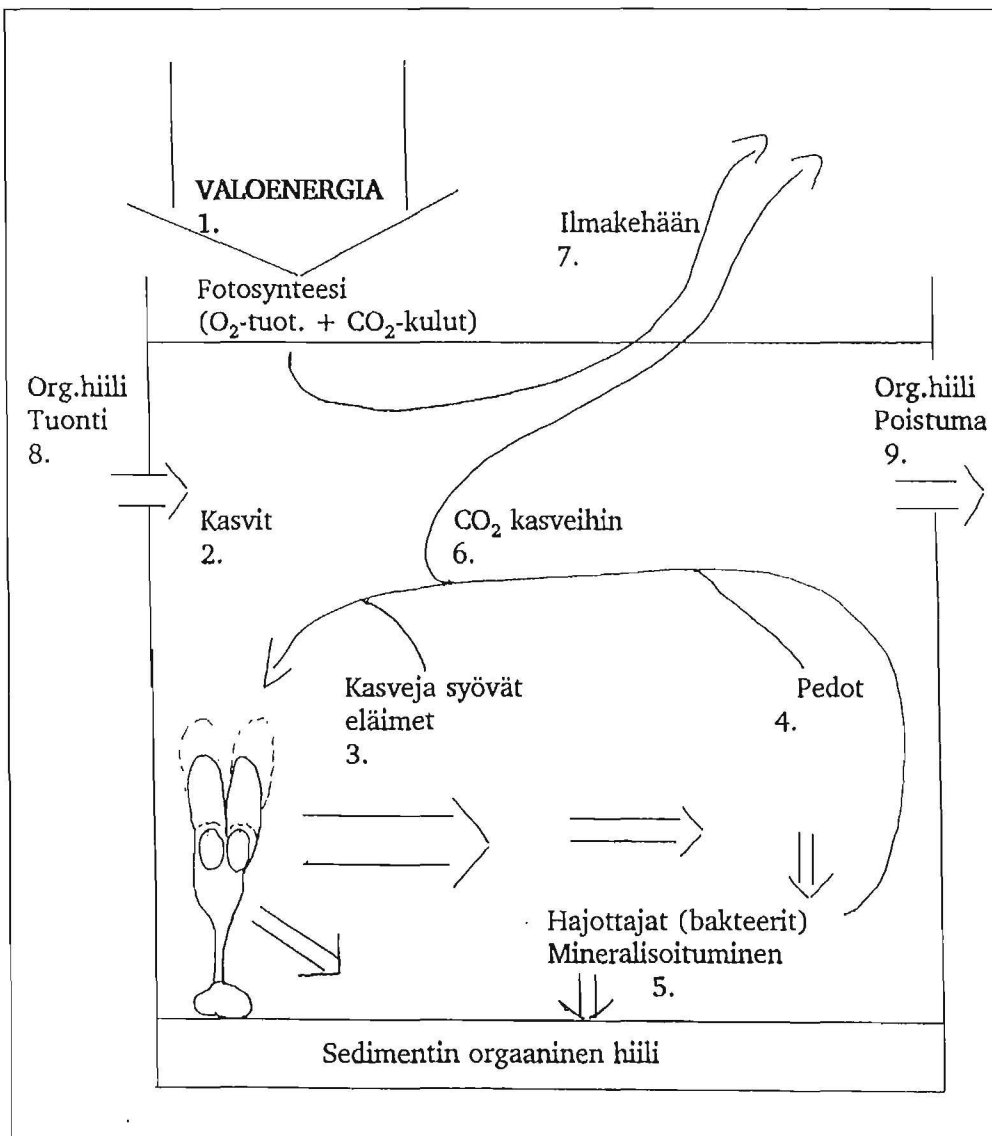
Kuva 27. Sedimentaatio malliekosysteemialtaissa koko altistusjakson aikana.



Kuva 28. Malliekosysteemialtaiden sisääntuloveden ja poistoveden välisen partikkelimaisen orgaanisen ainesmäärän (POM) ero koko altistusjakson aikana.

Tulosten tarkastelu

Tulostarkastelun aluksi on esitetty lyhyt ja yksinkertaistettu kuvaus ekosysteemin toiminnasta (Kuva 29). Kuvassa olevat numerot viittaavat kuvaa seuraavaan tekstiin. Tarkasteltaessa ympäristövaikutuksia ekosysteemitasolla ovat systeemiä säätelevät tekijät tärkeitä. Näillä tekijöillä on lisäksi merkitystä ekosysteemin rakenteen, ts. lajien, yksilömäärien ja lajien biomassan, kehitykselle vallitsevissa fysikaalisissa olosuhteissa. Käytettäessä malliekosysteemikokeita ympäristövaikutusten tutkimuksessa eräs tärkeä kysymys on, kuinka erottaa altistuksen aiheuttama vaikutus ekosysteemin luonnollisesta kehityksestä?



Kuva 29. Yksinkertaistettu ekosysteemin toiminnan kuvaus.

1. Valo on ehdottoman tärkeä perustuotannolle (kasvien hapentuotto ja hiilidioksidin kulutus). Energiavirta on yksisuuntainen siten, että energia poistuu lämpönä /hiilidioksidina ravintoketjun jokaisessa vaiheessa. Energiasta poistuu noin 90 % jokaisen ravintoketjun tason välillä. Kasvit absorboivat tulevasta valoenergiasta vain noin 50 % tai vähemmän ja vielä vähemmän, 1-5 % muutetaan ravinnoksi. Ravintoa voidaan pitää malliekosysteemin ylempien ravintoketjun tasojen energiana. Ekosysteemin läpi virtaava energia noudattaa termodynamiikan lakeja.
2. Kasvit rakentavat orgaanista hiiltä kuluttamalla CO₂:ta ja tuottamalla O₂:ta auringonvalon vaikutuksesta. Kun hapetta tuotetaan enemmän kuin mitä sitä kulutetaan ekosysteemi on autotrofinen eli omavarainen.
3. Kasvit muuttavat fotosynteesissä osan tulevasta valoenergiasta orgaaniseksi hiileksi joka toimii ravintona kasvia syöville eläimille (I asteen kuluttajat).
4. Pedot (II asteen kuluttajat) käyttävät I asteen kuluttajien sisältämää hiiltä. Jokaisessa perustuotannon jälkeisessä vaiheessa kulutetaan hapetta ja tuotetaan hiilidioksidia.
5. Kaikki elävät organismit päätyvät lopulta hajottajien kuten bakteerien ravinnoksi. Hajottajat kuluttavat lisää hapetta ja tuottavat lisää hiilidioksidia. Vesiekosysteemeissä hajottajat muodostavat sedimenttiin suuria yhteisöjä. Sedimentti toimii orgaanisen hiilen varastona, jota sedimentissä elävät eläimet käyttävät rakennusaineenaan. Samanaikaisesti osa hiilestä vapautuu hiilidioksidina kasvien käytettäväksi.
6. Hengityskaasu CO₂ käytetään kasvien toimesta tai
7. mikäli hiilidioksidin tuotto on suuri suhteessa kasveihin varastoituvaa biomassaan, hiilidioksidi poistuu systeemistä. Ekosysteemi on heterotrofinen kun hiilidioksidin tuotto on kulutusta suurempi ja hapetta kuluu tuotantoa enemmän.
8. Heterotrofinen ekosysteemi tarvitsee ulkopuolista lisäenergiaa. Tällainen ekosysteemi ei pysty omavaraisesti ylläpitämään toimintaansa ilman, että hapetta tuodaan ja hiilidioksidia poistetaan systeemistä.
9. Häiriintymättömissä ekosysteemeissä hiilen kulutus on tuottoa suurempi ts. ekosysteemillä on hyvät edellytykset muuttaa energiaa orgaaniseksi rakennusaineeksi. Häiriytyneissä ekosysteemeissä nämä edellytykset ovat usein pienentyneet ja sen seurauksena hiiltä poistuu systeemistä.

Odumin (1985) mukaan "stressatussa" ekosysteemeissä voidaan olettaa taulukossa 7 esitettyjä suuntauksia. Stressillä ymmärretään tässä yhteydessä haitallista tai epäjärgestystä aiheuttavaa vaikutusta. Ekosysteemeissä, joihin ei kohdistu voimakkaista ulkopuolisia häiriötekijöitä organismien biomassalla ja koolla esimerkiksi on taipumus suurentua ja yhteisön nettotuotanto vähenee. Häiriöt, joihin yhteisö ei ole adaptoitunut usein muuttavat sen normaalia kehitystä.

Teoreettisesti yhteisön hengityksen (CO₂-tuotto) lisääntymisen pitäisi olla ensimmäinen hälyttävä merkki stressistä, koska häiriötekijöiden aiheuttamien vaurioiden korjaaminen vaatii kasvuun ja tuottoon suunnatun energian käyttämistä ylläpitoon. Käytännössä tämä kuitenkin on hankalaa, sillä pientä hengityksen lisääntymistä on vaikea havaita suurissa avoimissa systeemeissä, koska hiilidioksidia poistuu helposti ilmakehään, jota ei perinteisillä menetelmillä voida mitata. Yhteisön hengitys biomassayksikköä kohden pyrkii lisääntymään ja biomassan tuotto vähenee yksilöiden sopeutuessa epätavallisen ulkopuolisen ärsykeen aiheuttamaan häiriöön. Biomassan suhde energiavirtaan pienenee tai ekosysteemin tehokkuus muuntaa saamaansa energiaa rakennusaineeksi on alhainen.

Ravinteiden vähentynyt kierto ja horisontaalinen kulkeutuminen saavat aikaan ravinteiden poistumista systeemistä. Vastaavanlaista poistumista saattaa ta-

pahtua tuotetulle, mutta käyttämättömälle hiilelle. Yhteisön rakenteessa pieniko-koisten ja nopeasti lisääntyvien eliölajien osuus kasvaa. Ravintokierron lyhenemi-sen on usein todettu olevan seurausta II asteen kuluttajien eli petojen määrän vä-hentymisestä ravintoketjun huipulla toisaalta rehevöityneissä ja toisaalta voimak-kaasti likaantuneissa ekosysteemeissä (Odum 1985).

Taulukko 7. Stressatussa ekosysteemissä odotettavissa olevia suuntauksia (Odum 1985).

| |
|---|
| ENERGETIIKKA |
| 1. Yhteisön hengitys (CO ₂ -tuotto) lisääntyy |
| 2. P/R (tuotanto/hengitys) epätasapainottuu (< tai > 1) |
| 3. P/B ja R/B (ylläpito suhteessa biomassan rakenteeseen) lisääntyy |
| 4. Ulkopuolisen energian tarve lisääntyy |
| 5. Perustuotannon käyttämätön osa lisääntyy |
| RAVINNEKIERTO |
| 6. Ravinteiden vaihto lisääntyy |
| 7. Ravinteiden horisontaalinen kulkeutuminen kasvaa ja vertikaalinen kierto vähenee |
| 8. Ravinteiden hävikki lisääntyy (systeemi vuotaa) |
| YHTEISÖN RAKENNE |
| 9. Opportunistien osuus kasvaa |
| 10. Eliöiden koko pienenee |
| 11. Eliöiden tai niiden osien (esim. lehdet) elinkierto lyhenee |
| 12. Ravintoketjut lyhenevät, koska energiavirta ylemmille trofiatasoille pienenee ja/tai pedot ovat herkempiä häiriölle |
| 13. Lajiston monimuotoisuus vähenee |
| YLEISET SUUNTAUKSET SYSTEEMITASOLLA |
| 14. Ekosysteemi tulee avoimemmaksi (ulkopuolisten ympäristöjen merkitys lisääntyy koska sisänen kierto vähenee) |
| 15. Autogeeniset sukkessiosuuntauksiset muuttuvat (sukkessio palaa aikaisempiin vaiheisiin) |
| 16. Resurssien tehokas käyttö vähenee |
| 17. Loisia ja muut negatiiviset vuorovaikutukset lisääntyvät, ja lajien yhteistoiminta vähenee |
| 18. Toiminnalliset ominaisuudet (kuten yhteisön aineenvaihdunta) ovat vastustuskykyisempiä verrattuna lajistoon ja muihin rakenteellisiin ominaisuuksiin. |

Taulukossa 7 esitetty luettelo ei tarkoita sitä, että kaikkia siinä lueteltuja seikkoja havaittaisiin altistuneissa ekosysteemeissä, vaan ne ovat mahdollisuuksia, joita voi esiintyä esim. metsäteollisuuden jätevesille altistuneissa malliekosysteemeissä ja myös tehtaiden alapuolisissa vesiekosysteemeissä.

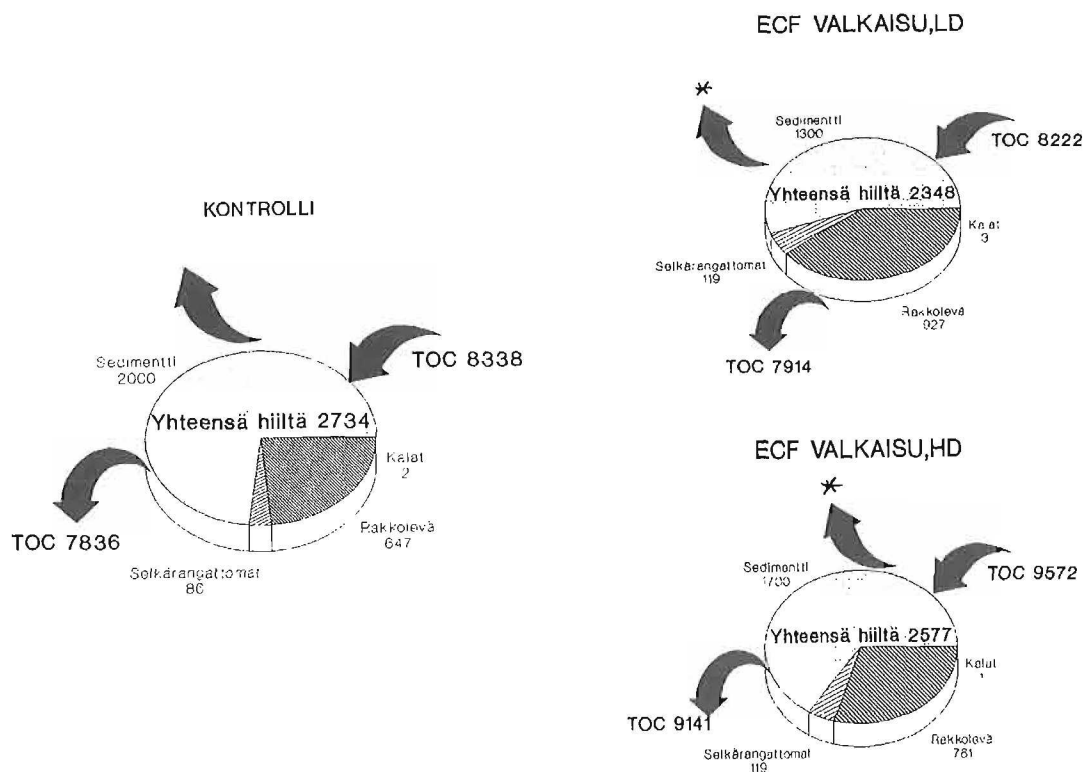
4.1 Jätevesikohtainen tarkastelu

Seuraavassa jätevesikohtaisessa tarkastelussa on kuvan avulla pyritty esittämään malliekosysteemialtaiden hiilitase kuvaamalla altaisiin tuloveden mukana ja toi-saalta poistoveden mukana poistuneen kokonaishiilen (TOC) määrä. Kuviin on li-säksi sisällytetty hiilen jakautuminen altaiden eri osiin.

Hiilitaseen lisäksi tarkastelussa on verrattu eri rakenteellisten ja toiminnallis-ten muuttijien suhdetta kontrolliin. Jätevesikohtaisesti on lyhyesti mainittu rakko-levästössä, eliöstössä ja kalastossa mahdollisesti tapahtuneet muutokset sekä tar-kasteltu ravinteiden kulkeutumista ja pidättymistä altaissa.

Kuvissa esitetty TOC:n määrä kuvaa koko tutkimusjakson aikana altaisiin tul-lutta ja sieltä poistunutta kokonaisorgaanisen hiilen (g) määrää.

ECF-VALKAISUJÄTEVESI KÄSITTELEMÄTÖN



* Hiilimäärän ero kontrolliin, jonka voidaan olettaa poistuneen altaista CO₂:na.

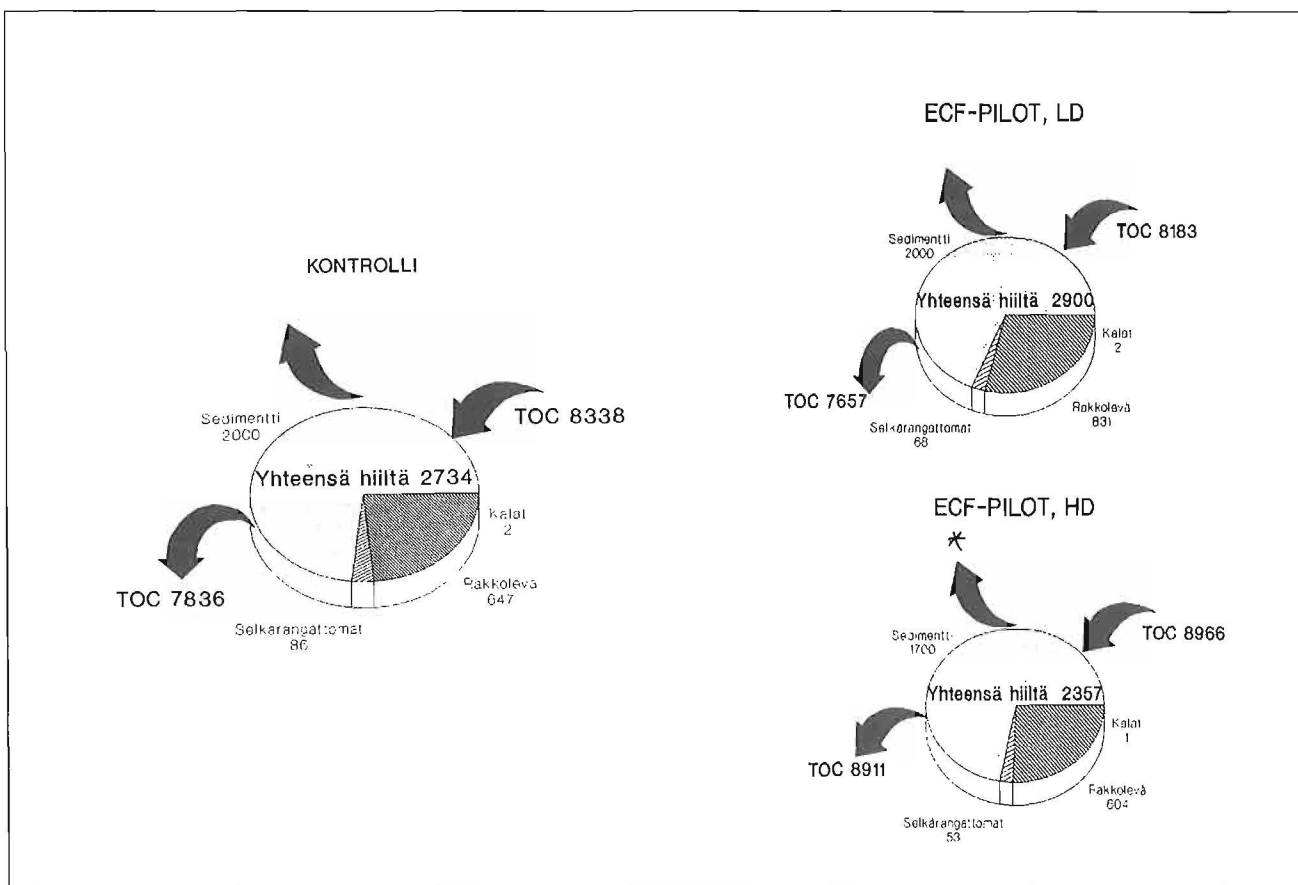
Energetiikka: Yhteisön hengitys on lisääntynyt kontrolliin verrattuna. Tuotettua hiiltä on pystytty hyödyntämään vähemmän kuin kontrollissa.

Ravinnekierto: Pienemmässä laimennuksessa (HD, high dose 1:400) havaittavissa lievää ravinteiden hävikkiä. Tämä näkyy altaaseen tulleiden ja sieltä poistuneiden ravinteiden ja hiilen pienempänä erotuksena.

Yhteisön rakenne: Ei merkittävämpiä muutoksia, lukuunottamatta pienemmässä laimennuksessa todettua rakkolevän kasvun hidastumista. Biomassan perusteella eliöiden koko on kasvanut. Altistus ei ole vaikuttanut kalojen lisääntymiskykyyn eikä kalojen kasvuun.

Yleistä: ECF-valkaisu-jätevedelle altistuneiden malliekosysteemiä taiden toiminnassa todetut lievät muutokset eivät ole heijastuneet yhteisön rakenteessa.

ECF-VALKAISUJÄTEVESI PILOT-KÄSITELTY



* Hiilimäärän ero kontrolliin, jonka voidaan olettaa poistuneen altaasta CO_2 :na. LD pystynyt pidättämään hiiltä.

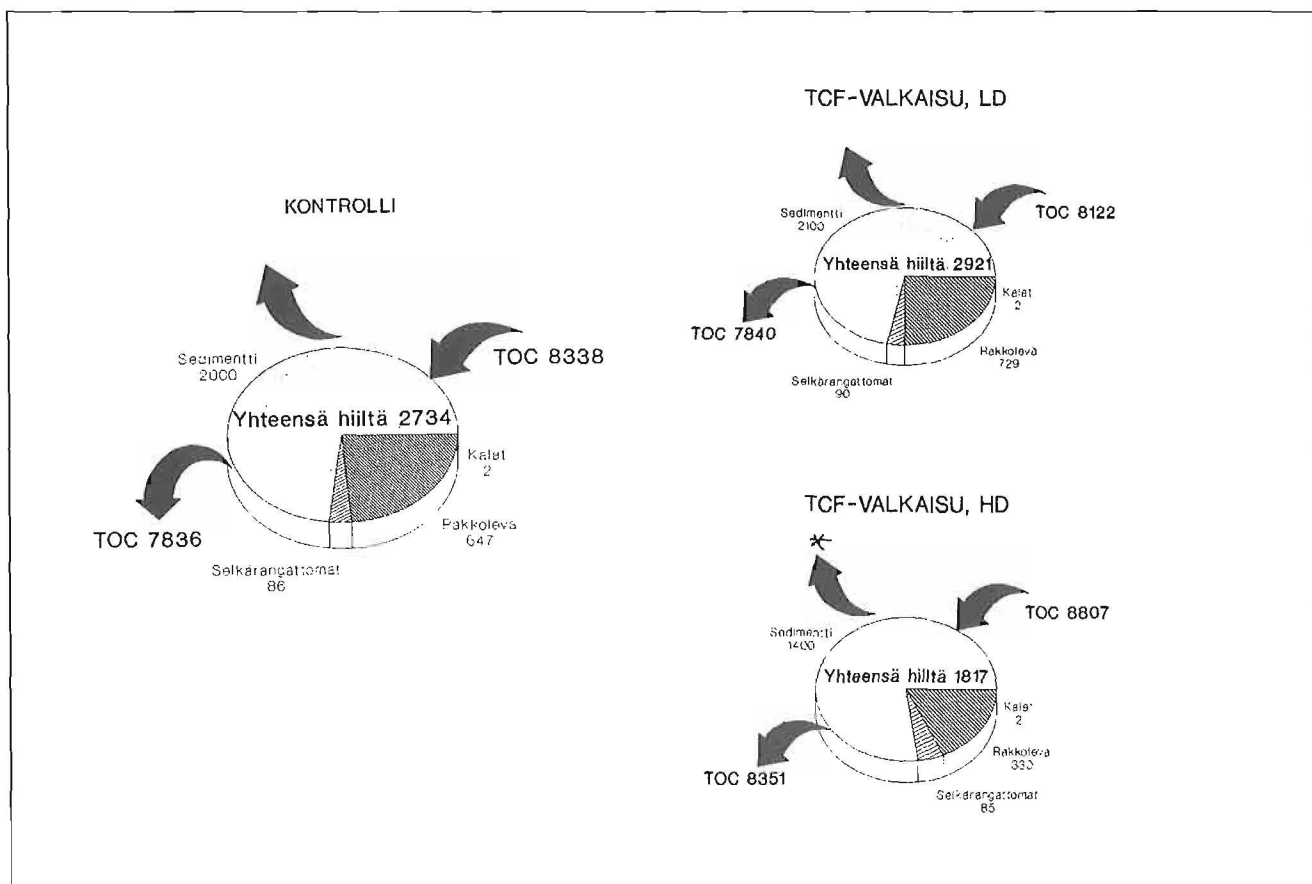
Energetiikka: Malliekosysteemin energetiikassa ei todettu kontrollin suhteen merkittäviä muutoksia.

Ravinteiden kierto: Etenkin pienemmässä laimennuksessa todettavissa ravinteiden hävikkiä.

Yhteisön rakenne: Rakkolevän kasvuun ei merkittävää vaikutusta. Eliöiden koko ja niiden lukumäärä kontrolliin nähden pienentynyt. Kalojen lisääntymiseen ja kasvuun ei vaikutuksia.

Yleistä: Käsittlemättömään ECF-valkaisuveteen verrattuna pilot-käsitelty jätevesi aiheuttaa enemmän muutoksia kontrolliin nähden, joka näkyy lähinnä ekosysteemin ravinnekierrossa ja eliöiden koon pienenemisenä.

TCF-VALKAISUJÄTEVESI KÄSITTELEMÄTÖN



* Hiilimäärän ero kontrolliin, jonka voidaan olettaa poistuneen altaasta CO₂:na. LD pystynyt pidättämään hiiltä.

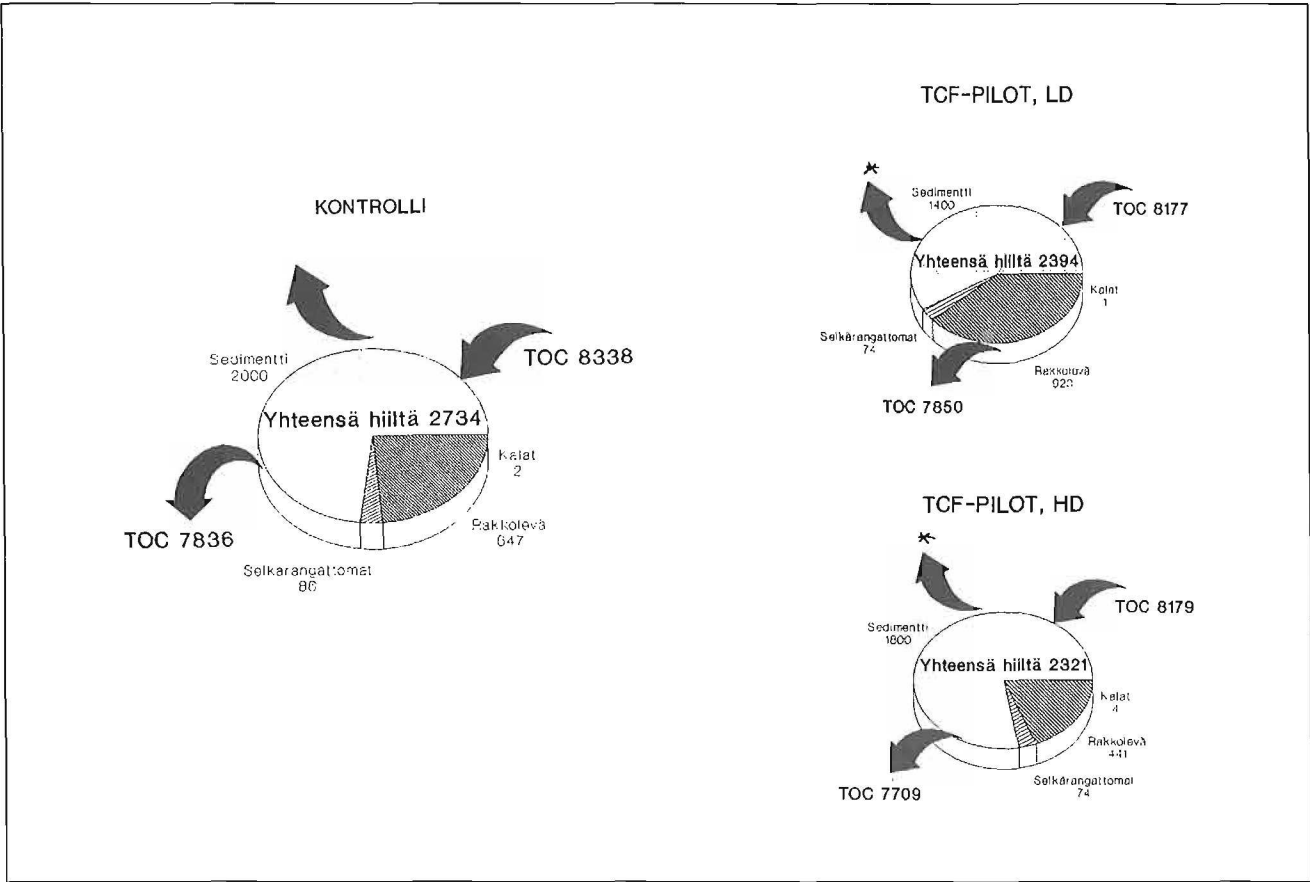
Energetiikka: Altistuneen malliekosysteemin energetiikassa ei ole havaittavissa merkittävää muutosta kontrolliin nähden. Tuotannon ja hengityksen välinen suhde samanlainen kuin kontrollissa.

Ravinnekierto: Pienemmässä laimennuksessa ravinteiden hävikki selvästi suurempaa kuin kontrollialtaassa.

Yhteisön rakenne: Pienemmässä laimennuksessa jätevedellä selvä vaikutus rakkolevän kasvuun. Vaikutus rakkolevään näkyy myös pienempänä rakkoleväeliöstön lukumääränä. Kalojen lisääntymiseen ja kasvuun jätevesialtistuksella ei ole ollut vaikutusta.

Yleistä: Pienemmässä laimennuksessa toiminnallisissa muuttujissa todetut muutokset eivät kuitenkaan ole aiheuttaneet merkittäviä vaikutuksia ekosysteemin rakenteessa lukuunottamatta rakkolevän eliöstöä.

TCF-VALKAISUJÄTEVESI PILOT-KÄSITELTY



* Hiilmäärän ero kontrolliin, jonka voidaan olettaa poistuneen altaista CO₂:na

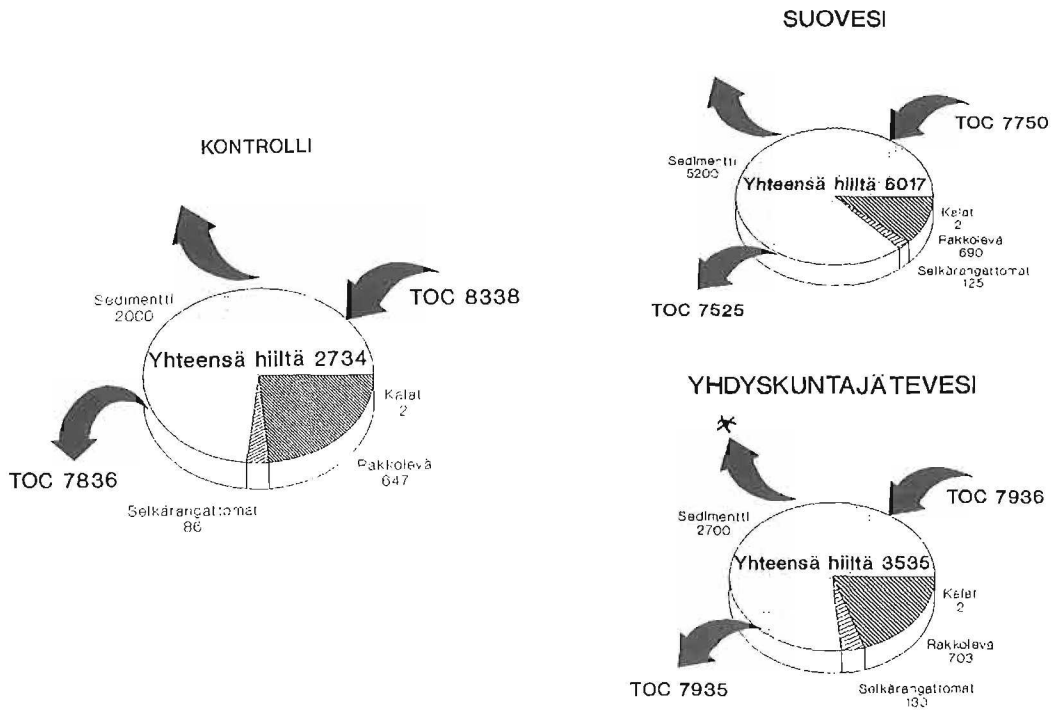
Energetiikka: Altistuneiden malliekosysteemien energetiikassa ei todettavissa merkittäviä muutoksia kontrolliin nähden. Yhteisön tuotannon ja hengityksen suhde samalla tasolla kuin kontrollialtaan. Kuitenkin vähemmän hiiltä sitoutunut.

Ravinnekierto: Suuremmassa laimennuksessa todettavissa ravinteiden hävikkiä altaasta.

Yhteisön rakenne: Yhteisön rakenteessa ei todettavissa merkittäviä muutoksia kontrolliin verrattuna. Pienemmässä laimennuksessa rakkolevän kasvu huonompaa, joka näkyy myös rakkoleväeliöstön pienempänä kokona. Kalojen lisääntymisessä ja kasvussa ei vaikutuksia.

Yleistä: Käsittelyn jälkeen tämän jäteveden malliekosysteemien toimintaan kohdistuvat vaikutukset ovat pienentyneet. Todetut muutokset toiminnallisissa muutujissa eivät näy yhteisön rakenteessa.

SUOVESI JA KÄSITELTY YHDYSKUNTAJÄTEVESI



* hajotuksen perusteella CO₂:ta poistunut ilmakehään.

Energetiikka: Yhteisön hengitys lisääntyy ja käyttämättömän perustuotannon osa lisääntyy. Ekosysteemien ylläpito suhteessa tuotettuun biomassaansa lisääntyy. Tuotettua hiilidioksidia ei enää pystytä käyttämään biomassan tuottoon.

Ravinnekierto: Yhdyskuntajätevedelle altistuneessa altaassa ravinteiden hävikki lisääntynyt merkittävästi Ammoniumia poistuu paljon altaasta, joka viittaa voimakkaaseen hajotustoimintaan. Allas ei myöskään pysty pidättämään hiiltä. Suovesi ei aiheuta yhtä voimakasta ravinnehävikkiä.

Yhteisön rakenne: Kummassakin altistuksessa on yhteisön rakenteessa todettavissa selvä rehevöityminen. Yhdyskuntajätevesi vaikuttaa haitallisesti rakkolevän kasvuun, joka toisaalta ei näy rakkolevän eliöstössä. Perifytonin määrissä myös selvää vähentymistä. Suovesiallas oli ainoa, jossa kalojen lisääntyminen oli kontrollialtasta huonompaa.

Yleistä: Yhdyskuntajätevedelle altistunut allas on saavuttanut katon, jossa ei enää pystytä hyödyntämään käytettävissä olevia ravinteita ja hiiltä (valo ja lämpötila rajoittavat), vaan koko systeemi vuotaa. Suovesi vaikuttaa rehevöittävästi.

4.2 Tutkittujen jätevesien vertailu

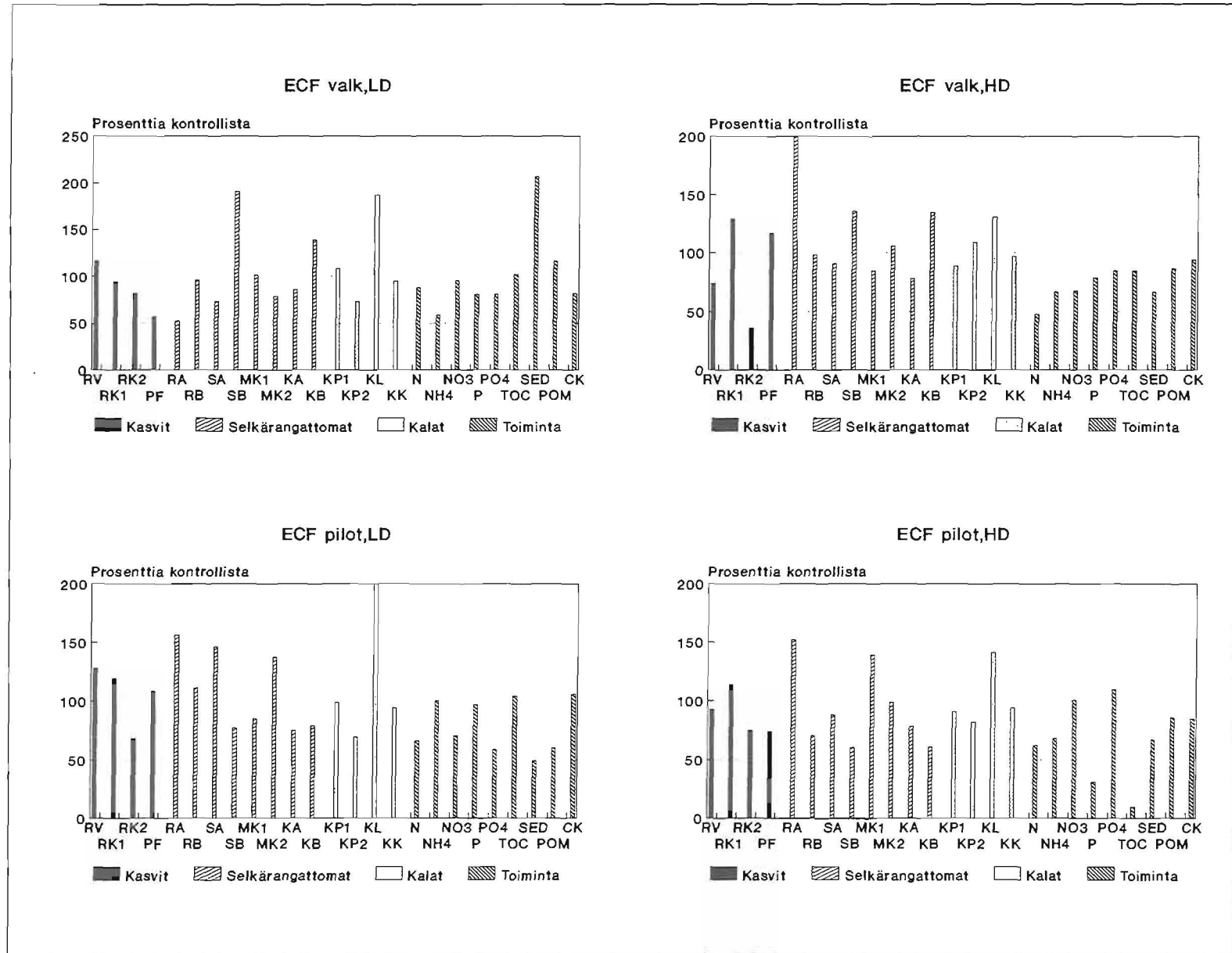
Malliekosysteemitutkimuksissa ekosysteemin rakennetta ja toimintaa kuvaavien muuttujien avulla saadaan runsaasti aineistoa ja tietoa, joka kuvaa ekosysteemin biottisten ja abiottisten osien vuorovaikutusta. Tulosten perusteella saatava vaikutuskuva voi heijastaa yhtä hyvin toksisia, ekosysteemin toimintaa estäviä, kuin rehevöittäviä vaikutuksia sekä niiden seurauksena aiheutuvia vuorovaikutuksia. Malliekosysteemitutkimusten tulokset poikkeavat tässä suhteessa usein yksinkertaisten toksisuustestien antamista tuloksista, joissa seurataan vain yhteen muuttu- jaan kohdistuvia vaikutuksia.

Malliekosysteemitutkimuksissa seurataan lukuisia, sekä systeemin toimintaa että rakennetta kuvaavia muuttujia. Kaikki nämä muuttujat ovat keskinäisessä vuorovaikutuksessa toisiinsa ja niiden ekologinen painottaminen vaikutuskuvan luomisessa on monimutkaista. Yleisesti voidaan sanoa, että vaikutukset toiminnallisissa muuttujissa aiheuttavat ekosysteemin kannalta suuremman häiriötekijän kuin yksittäisiin rakenteellisiin muuttujiin kohdistuvat vaikutukset. Kuvissa 30-32 on pyrkimyksenä tulosten esittäminen tiivistetyssä muodossa esittämällä malliekosysteemin oleellisia osia (kasvit, eläimistö ja toiminta) kuvaavien suureiden prosentuaalinen ero vastaaviin kontrolliarvoihin. Kunkin suureen kontrollialtaan arvolle on annettu arvo 100 % ja tutkituille vesille altistuneiden altaiden vastaavat suuret on suhteutettu prosentuaalisena erona tähän lukuun.

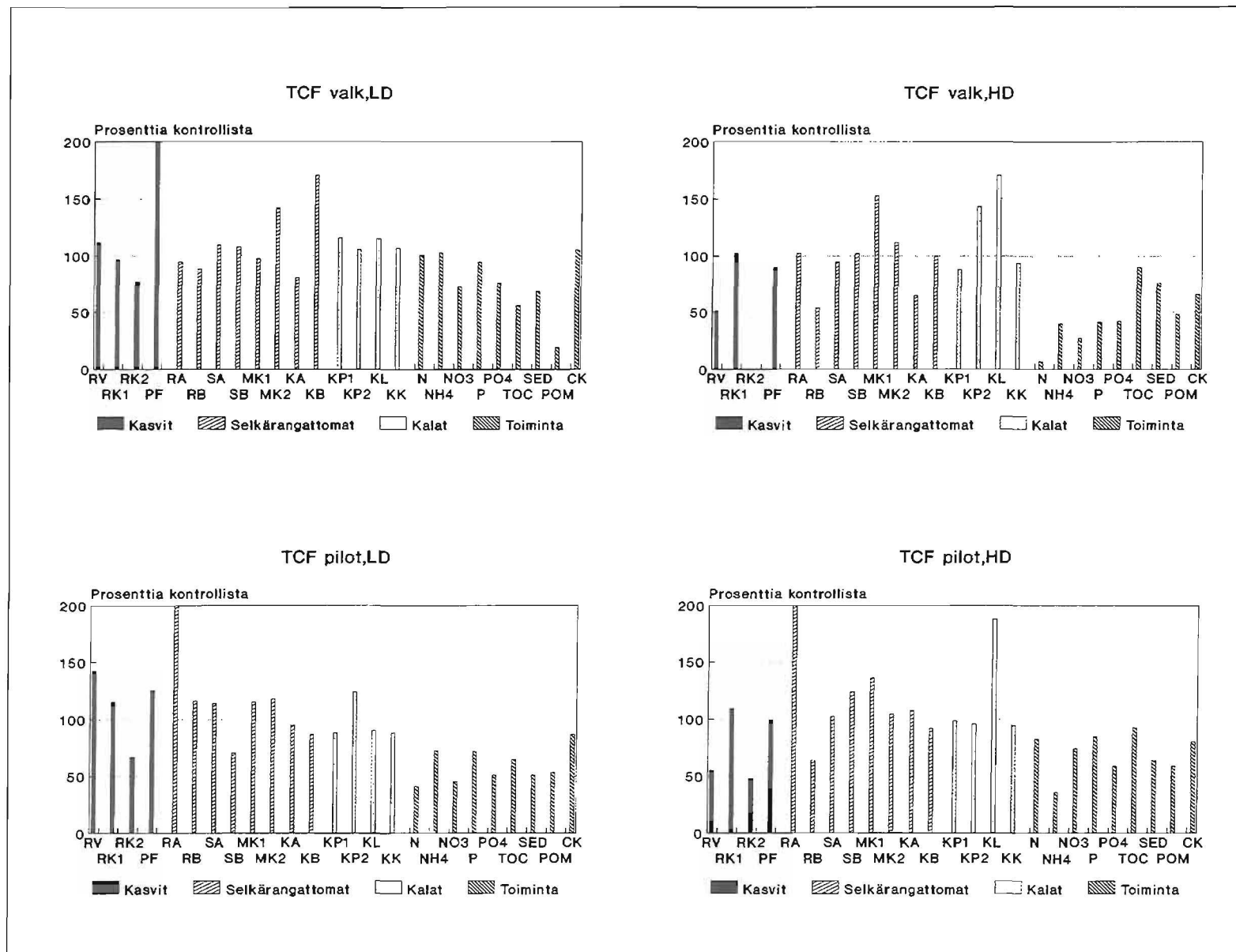
Kuvissa 30-32 esitetty suuret eivät edusta painoarvoltaan samanlaisia muuttujia, joka on huomioitava tuloksia tulkittaessa. Tällä tavoin on kuitenkin haluttu esittää tutkittujen jätevesien altistuksen aiheuttamia muutoksia verrattuna puhdasta murtovettä vastaanottaneeseen malliekosysteemiin. Yksityiskohtaisempi jätevesikohtainen tarkastelu on tehty edellisessä kohdassa 4.1.

Murtoveden tärkeimmän rakenteellisen komponentin, rakkolevän, suhteen muutokset ovat nähtävissä vasta toisena kasvukautena kesällä 1996. Ensimmäisenä kasvukautena jätevesialtistus ei ole aiheuttanut merkittäviä muutoksia rakkolevän kasvussa. TCF-altistuksen osalta tätä ei ole ollut odotettavissakaan, koska altistus alkoi vasta syyskuussa, jolloin kasvukausi on jo lopuillaan. Rakkolevän loppu-tilavuudessa eri altaissa ei myöskään ollut suurta eroa. Rakkolevän merkittävämpää häviämistä aiheutti ainostaan TCF-jätevesi pienemmässä laimennuksessa, eikä jäteveden käsittelyllä ollut tässä suhteessa vaikutusta.

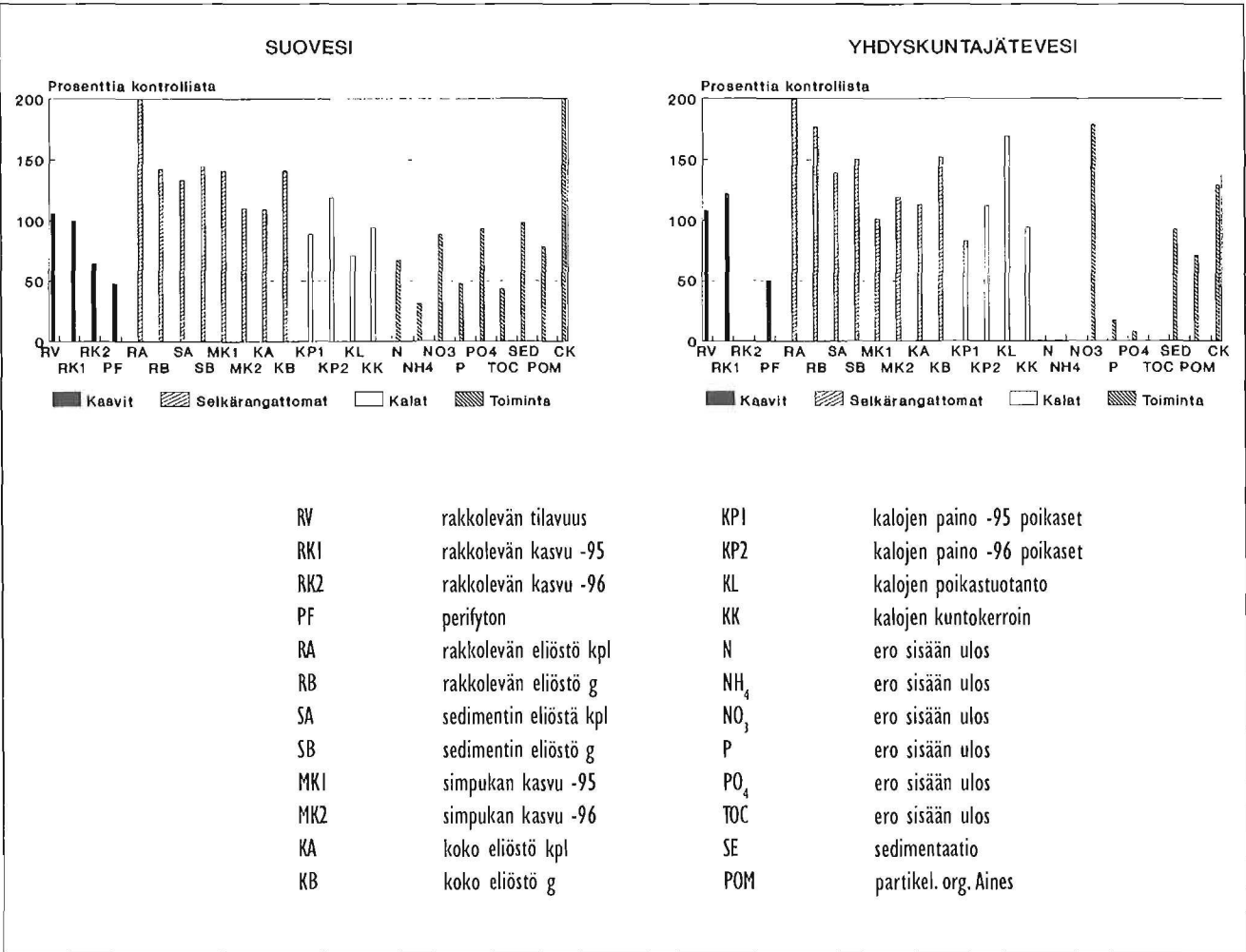
Toisena kasvukautena rakkolevän kasvu oli kaikissa altistuneissa malliekosysteemialtaissa kontrollialtaiden rakkolevän kasvua vähäisempää. Selvimmin tämä näkyi yhdyskuntajätevedelle ja käsittelemättömälle TCF-jätevedelle (HD, pienempi laimennus) altistuneissa altaissa. Myös käsittelemätön ECF-jätevesi (HD, pienempi laimennus) aiheutti selvää rakkolevän kasvun vähenemistä. Tulokset viittaavat siihen, että talviaikainen altistus on heikentänyt rakkolevän kuntoa, joka näkyy sitten heikompana kasvuna seuraavalla kasvukaudella. Rakkolevä kerää itseensä talven aikana ravinteita ja erityisesti ammoniumia. Tämä prosessi on saattanut häiriintyä, ja heijastuu heikompana kasvuna seuraavana kesänä.



Kuva 30. ECF-jätevesille altistettujen malliekosysteemien rakennetta ja toimintaa kuvaavien suureiden prosentuaalinen ero kontrolliarvoihin. Lyhenteet on esitetty kuvan 32 yhteydessä.



Kuva 31. TCF-jätevesille altistettujen malliekosysteemien rakennetta ja toimintaa kuvaavien suureiden prosentuaalinen ero kontrollista. Lyhenteet on esitetty kuvan 32 yhteydessä.



Kuva 32. Suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistettujen malliekosysteemien rakennetta ja toimintaa kuvaavien suureiden prosentuaalinen ero kontrolliin.

Malliekosysteemien eliöstön suhteen kontrollia pienempiä arvoja esiintyy lähinnä ECF-altistuksessa. Kontrolliarvoista poikkeavia suurempia arvoja esiintyy eniten suovesi- ja yhdyskuntajätevesi-altistuksessa. Tämä viittaa siihen, että suoveden ja yhdyskuntajäteveden rehevöittävä vaikutus olisi suurempi kuin tutkittujen valkaisu- ja jätevesien. Lajien ja eläinten lukumäärässä ei missään altistuksessa ole tapahtunut merkittävää pienentymistä. Tämä antaa aiheen olettaa, että jätevedet eivät ole merkittävästi heikentäneet eliöiden lisääntymismahdollisuuksia tai huonontaneet niiden elintilaa. Kontrolliarvoja pienempiä arvoja esiintyy lähinnä selkärangattomien biomassaa kuvaavissa suureissa ja enemmän ECF-altistuksessa.

Malliekosysteemien kalaston suhteen ECF- ja TCF-altistuksella ei ole ollut keskenäistä eroa. Kaikissa altaissa kalojen lisääntyminen onnistui ja jätevesille altistuneissa altaissa syntyneitä poikasia oli yleensä enemmän kuin kontrollialtaissa. Kalojen kasvussa ja kunnossa ei myöskään voitu havaita merkittäviä jätevesialtistuksesta aiheutuneita vaikutuksia. Suovesi ja yhdyskuntajätevesi eivät myöskään aiheuttaneet vaikutuksia kalojen kasvuun ja kuntoon, mutta suovesialtistuksessa kalojen lisääntyminen ei onnistunut yhtä hyvin kuin muissa altistuneissa altaissa.

Ekosysteemin toimintaa kuvaavissa suureissa muutoksia oli selvästi enemmän kuin rakennetta kuvaavissa suureissa. Selvästi eniten vaikutuksia ovat aiheuttaneet yhdyskuntajätevesi ja käsittelemätön TCF-jätevesi pienemmässä laimennuksessa (HD). Vaikutukset ovat kaikissa altaissa olleet selvästi ekosysteemin toimin-

taa estäviä ja pääasiassa näkyneet ravinteiden ja hiilen vuotamisena ulos systeemistä.

Vastaavanlaista vuotamista on todettu myös aikaisemmin metsäteollisuuden jätevesillä tehdyissä malliekosysteemitutkimuksissa (Lehtinen ym. 1992, 1993, 1995). Jätevesiä verrattaessa TCF-jätevedet näyttävät aiheuttavan enemmän vaikutuksia kuin ECF-jätevedet. Jäteveden käsittelyllä ei voida todeta mitään johdonmukaista vaikutusta aiheutuneisiin vaikutuksiin. Yksittäisten muuttujien kohdalla on todettavissa vaikutusten vähenemistä, mutta päinvastaistakin on havaittavissa, jolloin vaikutus on suurempi käsiteltyllä jätevedellä. Esimerkiksi ECF-jätevesi pienemmässä laimennuksessa (HD) aiheuttaa käsittelyn jälkeen enemmän toiminnallisia muutoksia kuin käsittelemätön jätevesi (Kuva 30).

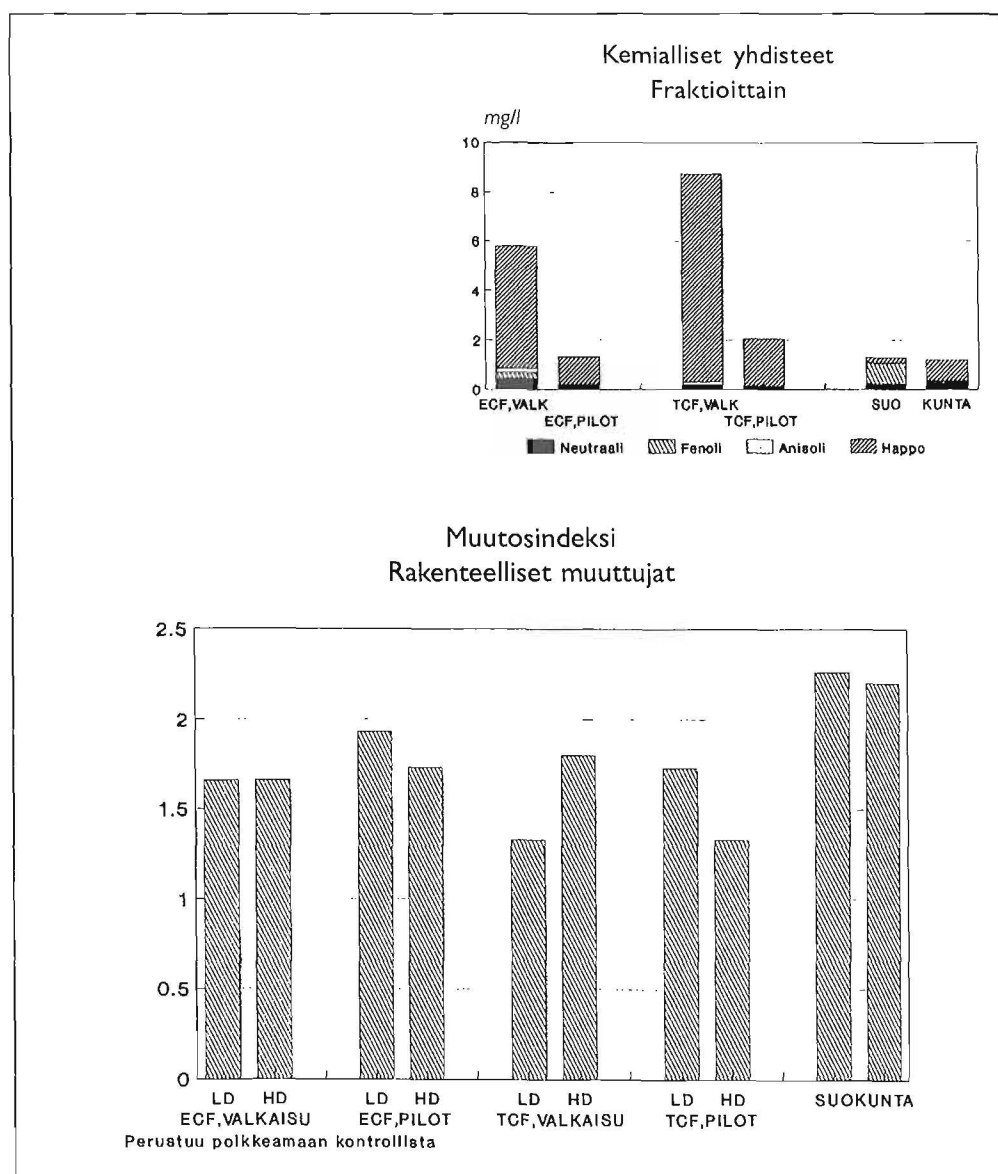
Tutkitut jätevedet voidaan pyrkiä asettamaan aiheuttamiensa muutosten suhteen keskinäiseen järjestykseen tavalla, jota käytettiin jo tämän projektin I:n vaiheen tulosten tarkastelussa. Tällöin puhuttiin vaikutusindeksistä, mutta koska eri tutkittujen suureiden ekologista painoarvoa on vaikea määrittää on selvempää puhua muutosindeksistä. Muutosindeksillä ymmärretään tässä yhteydessä sitä yhteismitallista muutosta, jonka tutkittava jätevesialtistus aiheuttaa kontrolliin nähden. Muutosindeksi perustuu prosentuaaliseen poikkeamaan kontrollista, joka pisteytetään ja mukaan on otettu sekä positiiviset että negatiiviset poikkeamat, eikä niitä ole erikseen painotettu indeksi-arvoa laskettaessa. Tavoitteena on siis ollut saada yksinkertaistettu tapa kuvata jätevesialtistuksen aiheuttamia muutoksia ja verrata eri tutkittuja jätevesiä keskenään. Prosentuaalinen poikkeama kontrollista pisteytetään siten, että poikkeama 0-10% saa 0 pistettä, 10-20% poikkeama antaa 1 pisteen, 20-30% 2 pistettä, 30-40% 3 pistettä, 40-50% 4 pistettä ja yli 50%:n poikkeama kontrollista antaa 5 pistettä.

Jätevesikohtaiset pisteet lasketaan yhteen ja jaetaan tutkittujen suureiden kokonaismäärällä. Näin saatua keskiarvoa kutsutaan muutosindeksiksi ja siinä on huomioitu sekä kontrolliarvoja suuremmat että myös kontrolliarvoja pienemmät arvot. Malliekosysteemien rakennetta kuvaavien muuttujien muutosindeksi on esitetty kuvassa 33 ja toimintaa kuvaavien muuttujien muutosindeksi on esitetty kuvassa 34.

Malliekosysteemin rakennetta kuvaavien suureiden osalta (Kuva 33) suurimman laskennallisen muutosindeksin aiheuttivat suovesi ja yhdyskuntajätevesi. Näiden vesien aiheuttamat vaikutukset olivat luonteeltaan rehevöittäviä. Jätevesistä suurimmat muutosindeksit aiheutti käsitelty ECF-jätevesi. ECF-jätevesien osalta eri laimennuksien välillä ei ollut eroa eikä laskennallisen muutosindeksin perusteella jäteveden käsittely vähentänyt vaikutuksia. TCF-jätevesien laskennalliset muutosindeksit olivat hieman ECF-jätevesien vastaavia pienempiä ja jäteveden käsittelyn voidaan olettaa vähentäneen vaikutuksia jonkin verran.

Malliekosysteemin toimintaa kuvaavien muuttujien osalta (Kuva 34) suurimman laskennallisen muutosindeksin aiheutti tässäkin tapauksessa yhdyskuntajätevesi. Yhtä suuren muutosindeksin aiheutti myös käsittelemätön TCF-jätevesi pienemmässä testilaimennuksessa. Suoveden aiheuttama toiminnallinen muutosindeksi oli samaa suuruusluokkaa kuin TCF-jätevesien aiheuttamat. ECF-jätevesien aiheuttamat muutosindeksit olivat suhteessa pienempiä kuin vastaavat TCF-jätevesien aiheuttamat muutosindeksit. Pääosin jätevesien samoin kuin suoveden ja yhdyskuntajäteveden aiheuttamat muutokset olivat ekosysteemin toimintaa estäviä. Odumin (1985) mukaan ekosysteemin toimintaan kohdistuvia vaikutuksia voidaan pitää ekologisesti merkittävämpinä kuin pelkästään ekosysteemin rakenteeseen kohdistuvat vaikutukset.

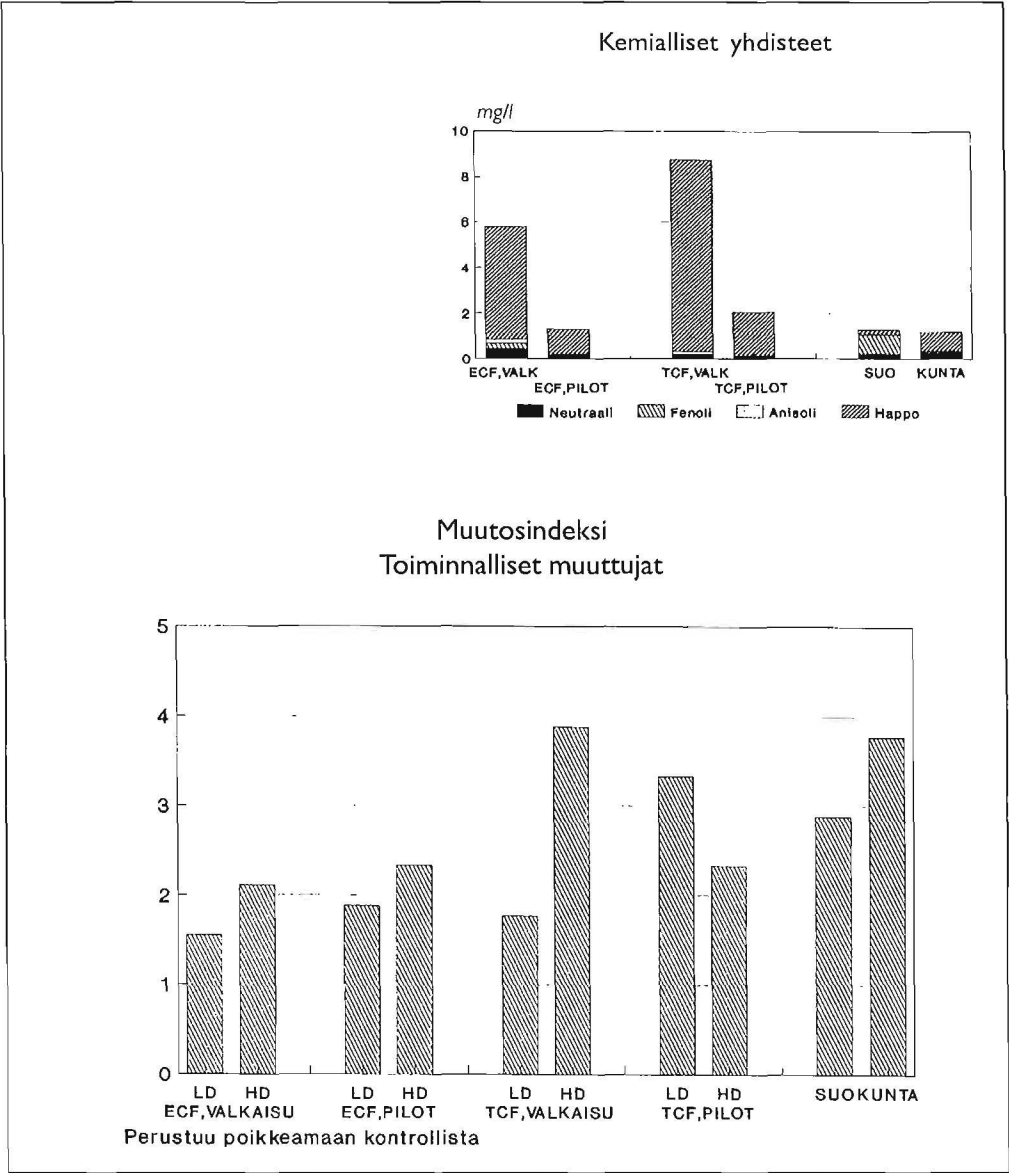
Jäteveden käsittelyllä ei ECF-jätevesien osalta ollut merkitystä. TCF-jäteveden kohdalla, testattaessa pienemmässä laimennuksessa (400 x), käsitelty jätevesi on aiheuttanut pienemmän muutosindeksin. Suuremmassa laimennuksessa (2000 x) TCF-jätevesi aiheutti enemmän muutoksia käsittelyn jälkeen. Muutosindeksien suu-



Kuva 33. Malliekosysteemin rakennetta kuvaavien muuttujien laskennallinen muutosindeksi (15 suuretta). Kuvan yläosassa on esitetty jätevesien kemiallisessa karakterisoinnissa havaittujen yhdisteiden määrä fraktioittain.

rentumista erityisesti rakenteellisten muuttujien osalta on myös aikaisemmin todettu SYTYKE-projektin yhteydessä tehdyissä lehtipuumassan tuotannosta aiheutuvien jätevesien vaikutustutkimuksissa (Lehtinen ym. 1992).

Verrattaessa jätevesien kemiallisessa karakterisoinnissa havaittujen eri yhdistefraktioiden määrää eri jätevesien aiheuttamiin laskennallisiin muutosindekseihin tai kuvissa 30-32 esitettyihin prosentuaalisiin eroihin kontrollista, ei mitään selvää keskinäistä riippuvuutta voida todeta. Kemiallisen karakterisoinnin mukaan TCF-jätevedestä löytyy enemmän yhdisteitä kuin ECF-jätevedestä. Rakenteellisia muuttujia kuvaavan muutosindeksin mukaan ECF-jätevesi aiheutti kuitenkin enemmän muutoksia kuin TCF-jätevesi. Samoin suovesi ja yhdyskuntajätevesi aiheuttivat enemmän muutoksia vaikka niissä kemiallisen karakterisoinnin mukaan esiintyi vähemmän yhdisteitä. Tutkittujen vesien aiheuttamat muutokset malliekosys-



Kuva 34. Malliekosysteemin toimintaa kuvaavien muuttujien laskennallinen muutosindeksi (9 suuretta). Kuvan yläosassa on esitetty jätevesien kemiallisessa karakterisoinnissa havaittujen yhdisteiden määrä fraktioittain.

teemien toimintamekanismeissa lienevät kuitenkin erilaisia. Valkaisujätevesien aiheuttamat muutokset enemmän kemiallisia, joka näkyy esim. hiilen pienempänä sitoutumisena sedimenttiin.

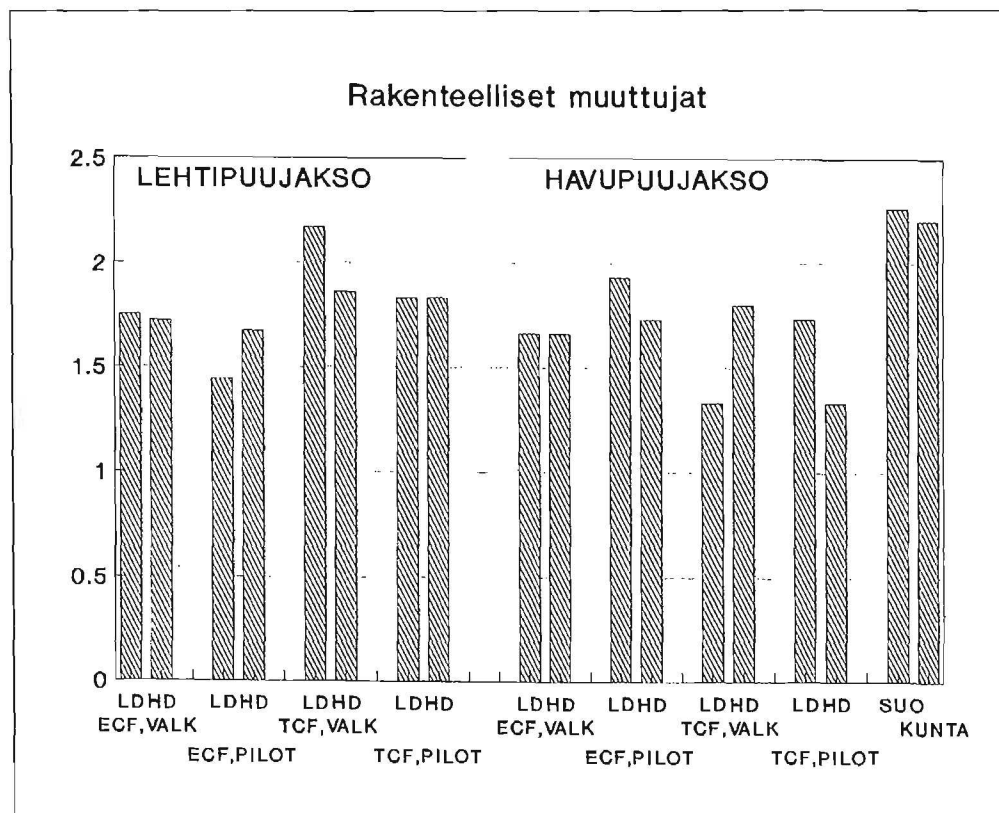
Ekosysteemin toimintaan liittyvien muuttujien laskennallisten muutosindeksien ja jätevesissä todettujen yhdisteiden kokonaismäärän välillä on havaittavissa vähäistä riippuvuutta (Kuva 34). Toisaalta yhdyskuntajätevesi aiheutti yhtä suuren muutosindeksin kuin käsittelemätön TCF-jätevesi vaikka näiden tutkittujen jätevesien yhdistemäärissä oli selvä ero. Yhdisteitä oli selvästi vähemmän käsiteltyssä yhdyskuntajätevedessä. Vastaavasti ECF-jätevesien ja suoveden aiheuttamat laskennalliset muutosindeksit ovat samaa suuruusluokkaa vaikka analysoitujen yhdisteiden kokonaismäärissä on selvä ero.

4.3 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin

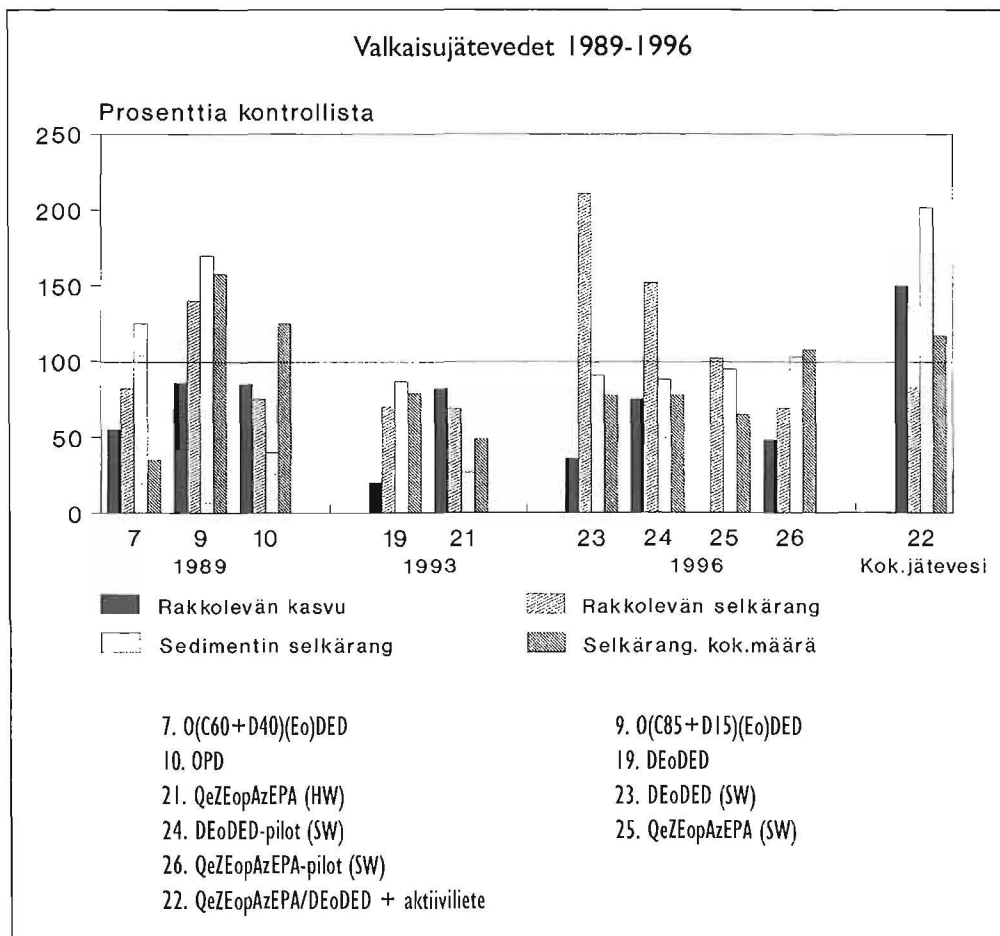
Tämän projektin I vaiheessa tutkittiin lehtipuujakson tuotannosta aiheutuvia ECF- ja TCF-valkaisun jätevesiä makean veden malliekosysteemeissä. Näiden tutkimusten tuloksissa ja niiden tarkastelussa on myös käytetty vastaavaa muutosindeksiä kuvaamaan eri jätevesien aiheuttamia eroja verrattuna kontrolliin. Vaiheen I raportissa (Sangfors ym. 1994) muutosindeksistä käytettiin nimitystä vaikutusindeksi. Kuvassa 35 on verrattu lehtipuujakson ja havupuujakson jätevesien aiheuttamia laskennallisia muutosindeksejä ja mukaan on lisäksi sisällytetty vastaavat luvut suovedellä ja yhdyskuntajätevedellä tehdyistä altistuksista.

Suurimman laskennallisen muutosindeksin rakenteellisten muuttujien osalta ovat aiheuttaneet suovesi ja yhdyskuntajätevesi, joiden muutosindeksit ovat sekä lehtipuujakson että havupuujakson valkaisujätevesien vastaavia suuremmat. Eri jätevesiä vertailtaessa havupuujakson jätevedet näyttäisivät aiheuttavan hieman pienemmät muutosindeksit kuin lehtipuujakson jätevedet (Kuva 35). Ekosysteemin rakenteellisten muuttujien osalta havupuujakson TCF-jätevedet aiheuttavat vähemmän muutoksia kuin ECF-jätevedet. Lehtipuujakson jätevesien osalta tilanne on päinvastainen. Jäteveden käsittely on vähentänyt muutoksia lehtipuujakson jätevesien osalta, mutta havupuujakson jätevesiin jäteveden käsittelyllä ei ole ollut vastaavaa vaikutusta.

Malliekosysteemeissä on vuodesta 1982 lähtien tutkittu erilaisia valkaisuprosesseja käyttävien tehtaiden valkaisu- ja kokonaisjätevesiä. Kuvassa 36 on esitetty vertailu eri valkaisujätevesien vaikutuksista murtoveden malliekosysteemeissä tutkittaviin rakenteellisiin muuttujiin. Rakenteellisina muuttujina on käytetty rakko-levän kasvua, rakkolevässä ja sedimentissä elävien selkärangattomien lukumäärää sekä selkärangattomien kokonaismäärää. Vaikutukset on esitetty prosentuaalisena



Kuva 35. Havu- ja lehtipuujakson valkaisujätevesille (ECF ja TCF) altistettujen malliekosysteemien rakennetta kuvaavien muuttujien laskennalliset muutosindeksit.



Kuva 36. Rakenteellisten muuttujien vertailu murtoveden malliekosysteemeissä, jotka on al-
tistettu valkaisu-jätevesille 400 kertaisena laimennuksena.

erona vastaavasta vertailualtaasta. Eläinten lukumäärää on pidetty tärkeämpänä, koska sen katsotaan paremmin heijastavan yhteisön käytettävissä olevaa perimää.

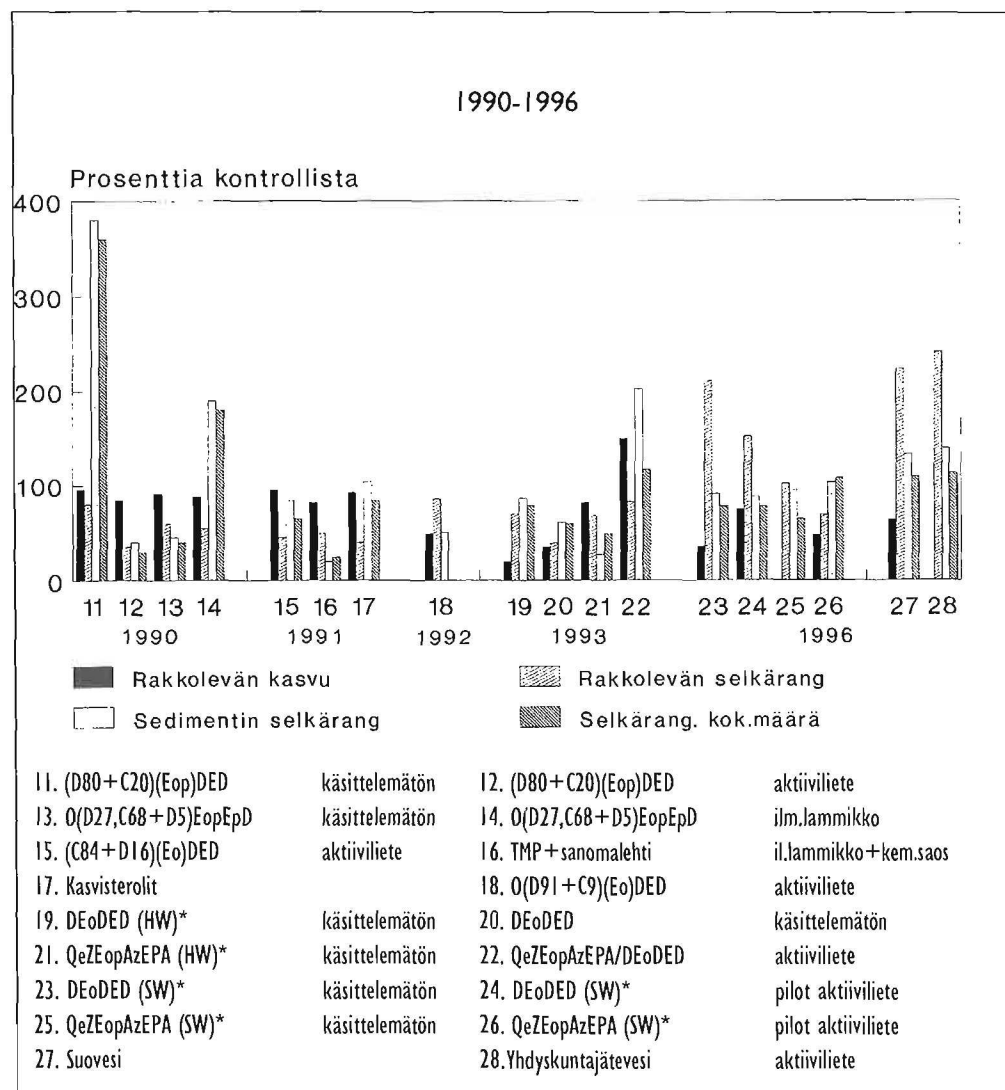
Negatiivisimmin rakenteellisiin muuttujiin ovat vaikuttaneet vuonna 1993 tut-
kitut lehtipuu-jätkön käsittelemättömät valkaisu-jätevedet. Vähiten negatiivisia vai-
kutuksia on aiheuttanut valkaisu-jätevesi, jossa prosessissa on käytetty 85% kloori-
a ja 15% klooridioksidia. Kaikki valkaisu-jätevedet vähentävät rakkolevän kasvua,
jota toisaalta ei ole todettu tutkimuksissa, joita on tehty nykyaikaisen tehtaan käsi-
tellyllä kokonais-jätevedellä (22 Kuva 36). Valkaisu-jätevesillä näyttäisi olevan vähem-
män rehevöittäviä vaikutuksia kuin kokonais-jätevedellä, mutta niiden negatiiviset vai-
kutukset malliekosysteemin rakenteeseen ovat kokonais-jätevetä suuremmat.

Kuvassa 37 on esitetty 1990-luvulla tehtyjen malliekosysteemi-kokeiden nel-
jän rakenteellisen muuttujan vertailua. Vertailussa on mukana sekä valkaisu-jäteve-
siä että kokonais-jätevesiä sekä nyt testatut käsittelemättömät ja pilot-käsitellyt ECF-
ja TCF-jätevedet samoin kuin suovesi ja käsitelty yhdyskuntajätevesi.

Kaikki tutkitut jätevedet, lukuunottamatta aktiivilietelaitoksessa käsiteltyä
sekä ECF- että TCF valkaisuusta peräisin olevia jakeita sisältänyttä kokonais-jätevetä
(22), ovat vähentäneet rakkolevän kasvua. Käsitelty kokonais-jätevesi (22) on myös
ainoa tutkituista vesistä, joka ei ole vaikuttanut negatiivisesti tutkittuihin paramet-
reihin. Sen vaikutusta voidaan pitää enemmänkin rehevöittävä. Samanlaisia, jos-
kin vielä voimakkaampia, vaikutuksia on suovedellä ja käsitellyllä yhdyskuntajä-
tevedellä (27, 28 Kuvassa 37). Näillä vesillä on kuitenkin ollut selvästi rakkolevän
kasvua haittaavaa vaikutusta. Tämän projektin yhteydessä testattujen havupuu-

jakson valkaisu-jätevesien (23-26, Kuva 37) aiheuttamat vaikutukset ovat yleisesti ottaen vähäisempiä kuin vuosien 1990-1993 aikana testatut valkaisu- ja kokonaisjätevedet, lukuunottamatta nykyaikaisen tehtaan käsiteltyä kokonaisjätevettä (22).

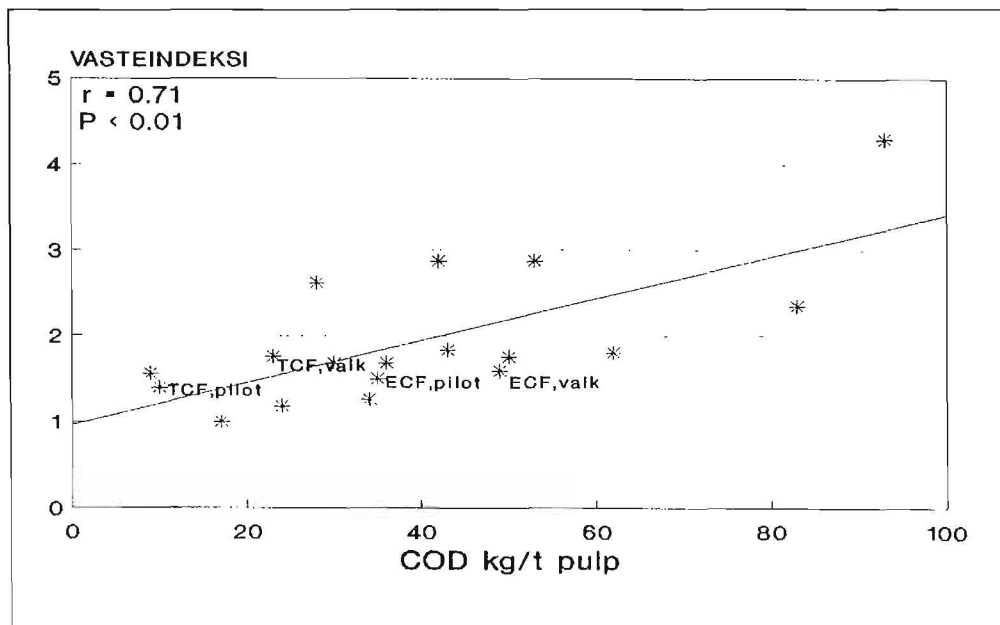
Selkärangattomien määrän lisääntymistä kontrolliin verrattuna todettiin myös altistettaessa käsittelemättömälle kokonaisjätevedelle (11, kuva 37), joka aiheutti merkittävimmän yksilömäärän lisääntymisen. Käsitelty jätevesi (14), joka oli peräisin alhaista kloorimultippelia valkaisuissa käyttävästä tehtaasta sai myös aikaan selkärangattomien määrän lisääntymistä altistuksen aikana. Kasvisteroleilla (17, Kuva 37) oli myös selvä vaikutus rakkolevässä elävien selkärangattomien määrään. Ilmastetun lammikon jälkeen kemiallisella saostuksella käsitelty TMP-sanomalehtipaperitehtaasta peräisin oleva jätevesi (16) aiheutti merkittäviä muutoksia malliekosysteemin rakenteellisiin muuttujiin. Rakenteellisten muuttujien tarkastelu ei kuitenkaan osoita selvää riippuvuutta valkaisu-prosessien ja selkärangattomien yhteisössä todettujen vaikutusten välillä.



Kuva 37. Rakenteellisten muuttujien vertailu vuosina 1990 - 1996 tehdyissä malliekosysteemitutkimuksissa.

Tässä tutkimuksessa laskettuja malliekosysteemin rakenteellisten muuttujien muutosindeksejä on edelleen verrattu metsäteollisuuden jätevesillä aikaisemmin suoritettuihin malliekosysteemitutkimuksiin ja niissä laskettuihin muutosindeksihin (Kuva 38). Kunkin tutkitun jäteveden muutosindeksi on suhteutettu COD:n määrään per tonni massaa (COD kg/t massaa).

Nyt tutkittujen havupuuajakson ECF- ja TCF-valkaisujätevesien aiheuttamat muutosindeksit ovat samaa suuruusluokkaa kuin tämän projektin I vaiheessa testattujen lehtipuuajakson vastaavien jätevesien aiheuttamat muutosindeksit. Muutosindeksillä ja COD kuormituksella näytä olevan keskinäistä riippuvuutta



Kuva 38. Tutkittujen ECF- ja TCF-valkaisujätevesien malliekosysteemissä aiheuttamien rakenteellisten muuttujien muutosindeksien vertailu aikaisempiin jätevesien malliekosysteemitutkimusten vastaaviin muutosindeksihin ja näiden indeksien riippuvuus COD:n määrään massatonna kohden.

5

Tutkimuksen yleiset johtopäätökset

- Tutkitut valkaisu-jätevedet eivät sellaisenaan joudu vesistöön
- Tavoitteena ollut tutkia eri valkaisu-prosesseista aiheutuvien jätevesien aiheuttamia muutoksia murtoveden malliekosysteemeissä sekä toisaalta verrata niitä luonnontilaisen suoveden ja käsitellyn yhdyskuntajäteveden aiheuttamiin muutoksiin.

Tutkittujen vesien myrkyllisyys (lyhytaikaistestit):

- Suovesi ja yhdyskuntajätevesi eivät ole akuutisti myrkyllisiä
- TCF-valkaisu-jätevesi oli levättestissä myrkyllisempää kuin ECF-jätevesi, muissa testeissä ei myrkyllisyyttä todettu
- Jäteveden käsittely vähentää myrkyllisyyttä, ECF-jätevesi ei enää akuutisti myrkyllistä levälle, TCF-jätevesi hieman myrkyllistä

Ekosysteemitaso:

- ECF- ja TCF-jätevesi aiheuttivat kumpikin vaikutuksia rakkolevään, TCF-jätevedellä suurempi vaikutus
- Yhdyskuntajätevedellä myös vaikutuksia rakkolevään
- ECF-jätevesi aiheuttaa enemmän muutoksia eliöyhteisössä
- TCF-jätevesi aiheuttaa enemmän muutoksia malliekosysteemin toiminnassa
- Jäteveden käsittely vähentää TCF-jäteveden aiheuttamia muutoksia malliekosysteemin toiminnassa
- ECF-jäteveden käsittely ei vähentänyt malliekosysteemin toiminnassa ja rakenteessa havaittuja muutoksia
- Tutkituista vesistä eniten muutoksia malliekosysteemeissä aiheutti käsitelty kunnallinen jätevesi
- Suovesi ja yhdyskuntajätevesi ovat selvästi valkaisu-jätevesiä rehevöittävämpiä. Yhdyskuntajätevesi aiheuttaa kuitenkin toiminnallisia muutoksia, jotka näkyvät heikompana tuotantona suhteessa käytettävissä oleviin ravinteisiin
- Vaikutusmekanismeissa eroa: Suoveden ja yhdyskuntajäteveden vaikutus rehevöittävä. Valkaisu-jätevesien vaikutusmekanismi enemmänkin kemiallinen, joka ilmenee esim. orgaanisen aineksen vähäisempänä sitoutumisena sedimenttiin

Vertailu happikemikaali I:een:

- Havupuu-jakson jätevedet aiheuttavat enemmän muutoksia malliekosysteemin toiminnassa kuin lehtipuu-jakson jätevedet (havupuussa mukana myös talviaikainen altistus)
- Talviaikainen altistus merkittävä tekijä tarkasteltaessa malliekosysteemin toimintaa kuvaavia muuttujia
- Aikaisempiin malliekosysteemitutkimuksiin verrattuna nyt tutkittujen jätevesien aiheuttamat muutokset malliekosysteemin rakenteeseen muita ennen tutkittuja valkaisu-jätevesiä pienemmät
- Suovesi ja yhdyskuntajätevesi aiheuttavat murtovesiympäristöä kuvaavissa malliekosysteemeissä enemmän muutoksia kuin tutkitut metsäteollisuuden jätevedet.

Kirjallisuus

- Bulich, A.A., Greene, M.W. and Isenberg, D.I. 1981. The reliability of the bacterial luminescence assay for the determination of toxicity of pure compounds and complex effluents. In D.R. Branson and K.L. Dickson (eds.) Aquatic Toxicology and Hazard Assessment. STP 737. ASTM. pp. 338-347.
- Gargas, E. 1975. A manual for phytoplankton primary production studies in the Baltic. BMB publ. 2, 1975.
- ISO 6341. 1989. Water quality- Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustaceae)
- ISO 8692. 1989. Water quality- Fresh water algae growth inhibition test with *Scenedesmus subspicatus* and *Selenastrum capricornutum*.
- ISO/DIS 11348. 1996. Water quality- Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test).
- Landner, L. (Ed.) 1989. Chemicals in the aquatic environment. Advances in hazard assessment. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 415 pp.
- Lehtinen, K-J., Tana, J. 1992. Effects in mesocosms exposed to effluents from bleached hardwood kraft pulp mill. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A 105. ISBN 951-47-6321-1.
- Lehtinen, K-J., Tana, J., Mattsson, K., Härdig, J., Karlsson, P., Grotell, C., Hemming, S., Engström, C., ja Hemming, J. 1993. Ecological impact of pulp mill effluents. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A 133. ISBN 951-47-7173-0.
- Lehtinen, K-J., Tana, J., Mattsson, K., Grotell, C., Bäckström, S., Engström, C. ja Hemming, J. 1995. Effects in model ecosystems of total mill effluents, bleach plant effluents and subprocess streams from production of ECF and TCF pulp. MFG rapportti. 1995. 82 pp.
- Linden, O., Rosemarin, A., Lindskog, C. Höglund, C. and Johansson, S. 1985. Effects of oil and oil dispersant on an enclosed marine ecosystem. Environm. Sci. Technol. 21: 374-382.
- Mikkelsen, P. & Paasivirta, J. 1996. TCF- ja ECF-mäntymassojen kokonaisjätevesien kemiallinen karakterisointi. Raportti, pp 8. Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Jyväskylä.
- Mikkelsen, P. & Paasivirta, J. 1997. TCF- ja ECF-mäntymassojen kokonaisjätevesien orgaanisten yhdisteiden kemiallinen karakterisointi. Vaiheen II yhteenvetoraportin osa. Raportti. Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos Jyväskylä.
- Odum, P.E. 1985. Trends expected in stressed ecosystems. BioScience 35(7): 419-422.
- Owens, J.W. 1991. The hazard assessment of pulp and paper effluents in the aquatic environment. A review. - Environ. Toxicol. Chem. 10: 1511-1540.
- SFS 5072. 1986. Vesitutkimukset- Myrkyllisyydesti leväpuhdasviljelmällä. Suomen standardisoimisliitto.
- Sangfors, O., Tana, J., Härdig, J., & Grotell, C. 1994. Malliekosysteemitutkimus ECF- ja TCF-sulfaattimassan tuotannosta aiheutuvien pilot-käsiteltyjen valkaisimojätevesien vaikutuksista. Teoksessa Verta, M. (toim) Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksista. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A 189. ISBN 951-47-9700-0.
- Tana, J. & Lehtinen, K-J. 1996. The aquatic environmental impact of pulping and bleaching operations - an overview. The finnish environment 17.
- Verta, M. (toim.), 1994. Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A No 189. ISBN 951-47-9700-0.
- Verta, M., Tana, J., Langi, A., Sannholm, G. Ahtiainen, J., Nakari, T., ja Puustinen, J. 1994. Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksista. Osa I. Teoksessa Verta, M. (toim.) Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksista. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A 189.

Osa II

Vaikutukset kalojen fysiologiaan - kirjolohialtistus

Jukka Tana, Karl-Johan Lehtinen, Tarja Nakari *,
Kaj Mattsson ja Marit Lagus

Suomen Ympäristötutkijaryhmä- MFG
Tekniikantie 12, FIN-02150 ESPOO

* Suomen ympäristökeskus
PL 140, FIN-00251 HELSINKI

Sisällys

Alkusanat67

Tiivistelmä68

I Johdanto69

2 Aineisto ja menetelmät.....70

2.1 Testatut jätevedet 70

2.2 Koejärjestelyt ja näytteenotto 71

2.3 Määritetyt muuttujat 72

3 Tulokset73

3.1 Sappianalyysit 73

3.2 Morfometria 76

3.3 Hematologia 78

3.4 Maksan toiminta 81

4 Tulosten tarkastelu ja yhteenveto84

5 Johtopäätökset93

Kirjallisuus94

Alkusanat

Happikemikaalien käyttöön perustuva sellun delignifiointi on yleistynyt Suomessa nopeasti 1990-luvun alusta lähtien. Massa valkaistaan nykyisin sekvensseillä, joissa ei käytetä alkuaineklooria valkaisukemikaalina (ECF-massa, Elementary Chlorine Free) tai joissa ei käytetä kloorikemikaaleja lainkaan (TCF-massa, Totally Chlorine Free).

Näiden kahden massatyypin jätevesien aiheuttamia ympäristövaikutuksia on tutkittu tutkimusprojektissa ”Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia”. Sen I vaihe aloitettiin keväällä 1993 ja saatiin päätökseen vuonna 1994. Kaksivuotisen tutkimusprojektin tavoitteena oli saada käsitys otsonin ja peroksidin käyttöön perustuvan valkaisun jätevesien ominaisuuksista ja ympäristövaikutuksista mahdollisimman monipuolisesti suhteellisen nopealla aikataululla ja niin, että tehdyt selvitykset olisivat kaikkien osapuolten teollisuuden, viranomaisten sekä tutkimus- ja kehitystahojen hyödynnettävissä. Tulokset on julkaistu vesi- ja ympäristöhallituksen julkaisusarjassa A 189 (Verta, toim. 1994). Vaiheessa I tehtiin valituille jätevesille kemiallinen ja biologinen karakterisointi, tutkittiin malliekosysteemeillä ECF- ja TCF-lehtipuumassan jätevesien vaikutuksia sekä tutkittiin kompleksin-muodostajien esiintymistä malliekosysteemissä ja luonnonvesissä.

Tutkimusprojektin vaihe II käynnistyi yhteistyöryhmän päätöksellä syksyllä 1994. Vaiheen I tulosten ja tehdyn kirjallisuustutkimuksen (Tana & Lehtinen 1996) perusteella katsottiin aiheelliseksi jatkaa malliekosysteemitutkimuksia ECF- ja TCF-havupuumassojen jätevesien vaikutustutkimuksilla. Lisäksi haluttiin saada vertailukohde vaiheen I lehtipuumassan ja vaiheen II havupuumassan jätevesien vaikutuksia kuvaaville tuloksille niiden merkityksen arvioimista varten. Tämän vuoksi vaiheeseen II päätettiin sisällyttää tutkimus aktiivilietelaitoksessa käsitellyn yhdyskuntajäteveden sekä suolta peräisin olevan veden vaikutuksista malliekosysteemissä.

Vaiheen II tavoitteena on ollut täydentää vaiheessa I saatuja tietoja lehti-puumassan osalta sekä toisaalta tarkastella myös talviajan aiheuttamia vaikutuksia.

Tässä raportissa käsitellään malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehtyjen kalatutustusten tuloksia ja varsinaisten malliekosysteemien tulokset raportoidaan myöhemmin kokeiden päättyttyä.

Tiivistelmä

Tämä tutkimus liittyy ”Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia” selvittävään projektiin, jonka tavoitteena on ollut saada käsitys otsonin ja peroksidin käyttöön perustuvan massanvalkaisun jätevesien ominaisuuksista ja ympäristövaikutuksista mahdollisimman monipuolisesti. Projektin I vaiheessa tutkittiin lehtipuumassan (koivu) tuotannosta aiheutuvien valkaisujätevesien vaikutuksia. Tässä raportissa käsitellään projekti II vaiheen malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehtyjen kala-altistusten tuloksia. Kokeet tehtiin syksyn 1995 aikana, jolloin juveniileja kirjolohia altistettiin havupuuajakson (mänty) sekä käsittelemättömille että pilot-aktiivilietelaitoksessa käsitellyille ECF- ja TCF-valkaisujätevesille, käsitellylle yhdyskuntajätevedelle sekä suovedelle.

Kaloja altistettiin erillisissä altaissa, jotka oli kytketty varsinaisten malliekosysteemi-altaiden poistoveteen ja altistuslaimennukset olivat jätevesien osalta 1:400 ja 1:2000. Suo- ja yhdyskuntajätevedelle kaloja altistettiin vain laimennoksessa 1:400 ja vertailuryhmän kalat olivat puhtaassa murtovedessä. Kaloja altistettiin 8 viikon ajan, jonka jälkeen niistä tutkittiin suhteellisen laaja morfometrinen, fysiologinen ja biokemiallisten muuttujien kirjo. Lisäksi tutkimuksissa analysoitiin sterolien ja muiden uuteaineiden sekä kloorifenolisten yhdisteiden pitoisuuksia kalojen sapesta määrittämään kalojen altistumisastetta.

Kalojen sapesta mitattujen yhdisteiden pitoisuudet olivat tausta-arvojen tasolla eikä pitoisuuksien ja kaloissa todettujen fysiologisten vasteiden välillä todettu riippuvuutta. Myöskään jäteveden klooratun orgaanisen aineksen (AOX) ja vasteiden välillä ei todettu riippuvuutta, joten AOX altistuksen kuvaajana on merkityksellinen.

Kaloihin kohdistuvat vaikutukset näkyivät selvimminkin energia-aineenvaihdunnassa ja maksan toiminnassa. ECF- ja TCF-valkaisujätevesien aiheuttamat vasteet olivat samansuuntaisia ja voimakkuudeltaan yhtä suuria. Nyt tutkittujen mäntyjajakson jätevesien aiheuttamat vaikutukset olivat samanlaisia, mutta hieman suurempia kuin projektin I vaiheessa tutkittujen koivujajakson vastaavien jätevesien aiheuttamat vaikutukset. Suo- ja käsitellyn yhdyskuntajäteveden todettiin aiheuttavan samanlaisia ja vähintään yhtä suuria vasteita kuin valkaisujätevesien. Suoritetun vertailun perusteella nykyaikaisista sulfaattiselutehtaista peräisin olevat valkaisu- ja käsitellyt kokonaisjätevedet eivät aiheuta kalayksilöissä suurempia vaikutuksia kuin luonnontilaisesta suosta valuvat vedet tai käsitelty yhdyskuntajätevesi.

YHTEENVETO VAIKUTUKSISTA

| Jätevesi | Morfologia | Hematologia | Maksan toiminta |
|--------------------|------------------|-------------|-----------------|
| Käsitelty ECF | 0 | 0 | ++ |
| Käsitelty TCF | 0 | + | ++ |
| Suovesi | + | 0 | ++ |
| Yhdyskuntajätevesi | 0 | 0 | ++ |
| 0 | = ei vaikutusta | | |
| + | = vaikutusta | | |
| ++ | = selvä vaikutus | | |

Johdanto

Viimeisten 20 vuoden aikana on käytetty erilaisia menetelmiä selvittämään metsäteollisuuden jätevesien biologisia vaikutuksia. Yksinkertaisimmat biologiset menetelmät ovat suurissa jätevesipitoisuuksissa akuuttia ja lyhytaikaista toksisuutta mittaavat yksilajitestit, joista käytetään yleisesti nimitystä toksisuustesti. Vaikka toksisuustestien ei ole voitu osoittaa ennustavan mahdollisia pienemmissä, mutta haitallisissa pitoisuuksissa todettavia vaikutuksia (subletaali) yksilö-, populaatio- ja yhteisötasolla, voidaan eri prosessien ja tehtaiden jätevedet niiden avulla asettaa järjestykseen suhteellisen toksisuuden mukaan. Toksisuustestejä on myöhemmin täydennetty subletaaleja ja kroonisia vaikutuksia selvittävillä tutkimuksilla, joissa on pääosin selvitetty kalafysiologisia vaikutuksia sekä laboratorio- että kenttäolosuhteissa. Näissä kokeissa on tarkasteltu hematologiaa, maksan toimintaa, vierasaineaineenvaihduntaa, lisääntymistä sekä immunologisia vasteita kuvaavia muuttujia (Owens 1991, Tana & Lehtinen 1996).

Kalafysiologisia tutkimuksia tehdään myös malliekosysteemikokeiden yhteydessä kuvaamaan vaikutuksia yksilötasolla. Kalojen fysiologisia vasteita tutkitaan erillisissä altaissa, jotka on kytketty varsinaisten malliekosysteemialtaiden poistoveteen. Tällainen koejärjestely puoltaa paikkaansa haluttaessa selvittää vallitsevan päästön vaikutuksia suhteellisen pitkäaikaisen altistuksen aikana koekaloihin, jotka edustavat geneettisesti yhdenmukaista aineistoa. Luonnon- kaloilla tehtävissä kenttätutkimuksissa on monesti vaikea erotella, johtuvatko todetut vaikutukset pelkästään vallitsevasta jätevesipäästöstä alueella, jossa myös muut päästölähteet ja "vanhat synnit" ovat vaikuttamassa. Vastaavanlaisia malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehtyjä kala-altistuksia on aikaisemmin käytetty selvittämään useiden erilaisten sulfaattimassan tuotannosta aiheutuvien jätevesien vaikutuksia (Lehtinen ym. 1992, 1993, Lehtinen & Tana 1996, Grahn & Grotell 1994, Sangfors ym. 1994, Tana ym. 1994).

Nyt raportoitavat kala-altistukset tehtiin syksyn 1995 aikana, jolloin juveniileja kirjolohia (*Oncorhynchus mykiss*) altistettiin havupuuajakson sekä käsittelemättömille että pilot-aktiivilietelaitoksessa käsitellyille ECF- ja TCF-jätevesille, käsitellylle yhdyskuntajätevedelle ja suovedelle.

2.1 Testatut jätevedet

Tutkimuksissa käytetyt jätevedet olivat Wisaforest Oy:n havupuuajakson ECF- ja TCF-ajojen käsittelemättömiä ja pilot-aktiivilietelaitoksessa käsiteltyjä valkaisimon jätevesiä. Jätevedet kerättiin kerta-näytteinä siten, että ECF-jätevesinäyte otettiin 24 kesäkuuta 1995 ja TCF-jätevesinäyte 31 elokuuta 1995. Pilot-laitoksen toiminnasta laaditaan erillinen raportti. Jätevesien lisäksi tutkittiin Rauman kaupungin jäteveden puhdistuslaitokselta ulosmenevä jätevesi sekä Oriveden Lakkasuolta kerätty vesi. Lakkasuo on luonnontilainen suo ja se kuuluu Hämeen ympäristökeskuksen jatkuvan tarkkailun piiriin.

Testattujen valkaisimojätevesien kemiallinen karakterisointi on tehty Jyväskylän yliopiston Kemian laitoksella ja biologinen karakterisointi Suomen ympäristökeskuksessa. Selvityksistä toimitetaan erillinen raportti (Mikkelsen & Paasivirta 1996). Testattujen vesien kemiallisia ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kala-altistuksissa käytettyjen valkaisimon jätevesien kemiallinen karakterisointi. Luvut osoittavat pitoisuutta mg/l.

| | ECF- valkaisu | ECF- pilot | TCF- valkaisu | TCF- pilot | SUO | KUNTA |
|-------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|-------|-------|
| BOD ₇ | 432 | 51 | 369 | 133 | | |
| COD _{Cr} | 1952 | 1389 | 1442 | 629 | | |
| TOC | 733 | 490 | 564 | 250 | 38 | 20 |
| AOX | 22,2 | 17,1 | 0,77 | 0,75 | 0,13 | 0,11 |
| EOX | 0,42 | 0,11 | - | - | 0,013 | 0,018 |
| Kiintoaine | 34 | 3 | 22 | 17 | | |
| tot-N | 8,1 | 2,3 | 4,8 | 2,6 | | |
| tot-P | 1,3 | 0,12 | 1,6 | 0,75 | | |

Valkaisimon vedenkulutus ECF ajon yhteydessä oli 25 m³/tonni massaa ja TCF ajon yhteydessä 16,5 m³/tonni massaa.

Tutkittujen jätevesien, suoveden ja yhdyskuntajäteveden kemiallisessa karakterisoinnissa näytevesistä tutkittiin neutraaliaineet, heikot hapot (fenoli-fraktio ja anisoli-fraktio) ja vahvat hapot kukin omasta, uudesta näytevesimäärästä. Taulukossa 2 on esitetty analyyseissä havaittujen yhdisteiden kokonaismäärät fraktioitain. Tunnistettujen yhdisteiden molekyylipainot vaihtelevat 90 ja 500 välillä.

Taulukko 2. Jätevesien kemiallisessa karakterisoinnissa tunnistettujen yhdisteiden kokonaismäärät (µg/l) fraktioitain (Mikkelsen & Paasivirta 1996).

| Fraktio | ECF-valk. | ECF-pilot | TCF-valk. | TCF-pilot | SUO | KUNTA |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-------|
| Neutraali | 440 | 113 | 186 | 86 | 222 | 238 |
| Fenoli | 244 | 17 | 40 | 12 | 834 | 69 |
| Anisoli | 182 | 73 | 78 | 26 | 24 | 45 |
| Happo | 4926 | 1087 | 8444 | 1921 | 196 | 834 |

Tässä yhteydessä ei yksityiskohtaisesti tarkastella eri fraktioita ja yhdisteiden määriä eri jätevesissä. Syytä on kuitenkin todeta, että kaikkien fraktioiden kohdalla yhdisteiden kokonaismäärät olivat pienempiä pilot-käsitellyissä jätevesissä. Happofraktiota lukuunottamatta yhdisteiden määrät olivat suurempia ECF-jätevedessä kuin TCF-jätevedessä. Fenolifraktion yhdisteiden kokonaismäärä oli suovedessä selvästi muita tutkittuja vesiä suurempi. Suo- ja yhdyskuntajäteveden neutraali- ja fenolifraktioissa yhdisteiden kokonaismäärät olivat suurempia kuin käsiteltyjen valkaisu-jätevesien, mutta anisoli- ja happofraktiossa pienempiä tai yhtä suuria kuin käsitellyissä valkaisu-jätevesissä. Fenolifraktiota lukuunottamatta yhdisteiden kokonaismäärät olivat käsitellyssä yhdyskuntajätevedessä suurempia kuin suovedessä.

2.2 Koejärjestelyt ja näytteenotto

Malliekosysteemikokeiden yhteydessä altistettiin Suomen Ympäristötutkijaryhmän tutkimusasemalla Nauvossa juveniileja (ei sukukypsä) kirjolohia (*Oncorhynchus mykiss*) valkaisu-jätevesille 400 kertaisessa (high dose, HD) ja 2000 kertaisessa (low dose, LD) laimennuksessa. Laimennukset olivat samat, joita on käytetty aikaisemmin metsäteollisuuden jätevesillä tehdyissä vastaavissa malliekosysteemi-kokeissa. Vertailuryhmän kalat olivat puhtaassa murtovedessä. Vertailuryhmän ja altistusryhmien kalat olivat 500 litran altaissa, jotka oli kytketty malliekosysteemi-altaiden poistoveteen. Kirjolohialtaiden vesitys toimi läpivirtausmenetelmällä ja veden virtaus oli 2,8 l/min antaen viipymäksi 3 tuntia. Kirjolohialtaisiin oli järjestetty jatkuva ilmastus koko altistuksen ajaksi ja altaiden happipitoisuus vaihteli välillä 8,5 - 9,7 mg O₂/l. Altistus kesti 8 viikkoa ja se alkoi 4. päivä syyskuuta ja kesti 1. päivään marraskuuta 1995. Kokeen aikana murtoveden lämpötila laski +15 °C:sta +6 °C:een.

Koekalat hankittiin Paraisilta Valtion kalatalousoppilaitoksen kalanviljely-laitokselta, joka kuuluu valtakunnallisen kalatautitarkkailun piiriin. Kuljetuksen jälkeen kalat sijoitettiin sattumanvaraisesti koealtoiin siten, että kuhunkin altaaseen tuli 20 kalaa. Kokeen aikana kaloja ruokittiin päivittäin kuivarehulla kunnes kalat olivat kylläisiä (*ad libitum*). Annetun rehun määrää seurattiin ryhmäkohtaisesti päivittäin.

Näytteenotossa kalat haavittiin yksitellen altaasta ja tainnutettiin terävällä iskulla päähän. Sen jälkeen otettiin verinäyte (2 ml) selkäsuonista heparinoidulla (NH₄-heparinaatti) kertakäyttöruiskulla ja neulalla. Hematokriitti- ja leukokriitti-arvot määritettiin välittömästi Compur Microspin hematokriittisentrifugilla. Hemoglobiinianalyysiä varten mitattiin 10 ml verta kapillaariin, joka sijoitettiin hemoglobiinireagenssia (2,5 ml) sisältävään koeputkeen. Loppu verinäyte sentrifugoitii ja plasma pakastettiin Eppendorf-putkissa mahdollisia myöhempiä analyysejä varten.

Verinäytteenoton jälkeen kala mitattiin ja punnittiin, jonka jälkeen vatsaontelo avattiin. Sappirakko preparoitiin esiin ja siitä otettiin sappinäyte suoraan 1 ml:n kertakäyttöruiskulla. Sappinäytteet säilöttiin teflonseptumilla varustettuihin lasipulloihin siten, että aina neljästä (4) kalasta otetut näytteet yhdistettiin yhdeksi näytteeksi ja pakastettiin (-20 °C) myöhempiä analyysejä varten. Kustakin 20 kalan ryhmästä tuli siten 5 analysoitavaa sappinäytettä. Välittömästi sappinäytteen oton jälkeen kalan maksa irrotettiin, punnittiin ja paloiteltiin. Maksapalat asetettiin Eppendorf-putkiin ja säilöttiin nestemäiseen tyypeen (-196 °C) glykokeeni- ja lipidipitoisuuksien sekä entsyymiaktiivisuuksien määrittämiseksi.

Näytteenoton yhteydessä tutkittiin kalojen iho, kidukset, evät ja sisäelimet makroskooppisesti mahdollisten loisten ja sairauksien kuvaavien oireiden selvittämiseksi.

Kirjolohikokeissa tutkittujen fysiologisten muuttujien keskiarvojen eron tilastollinen merkitsevyys kontrollikalojen ja altistettujen kalojen välillä testattiin Student's t-testillä käyttäen Cochranin korjauskerrointa. Tilastolliset merkitsevyydet ovat:

***= $P < 0.001$; **= $P < 0.01$ *= $P < 0.05$

2.3 Määritetyt muuttujat

Kirjolohialtistuksessa analysoitiin kaikkiaan 14 eri muuttujaa kustakin kalasta. Nämä muuttujat voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: morfometriset, hematologiset ja biokemialliset muuttujat. Tämän raportin yhteenveto-osassa altistettujen kalojen fysiologiset vasteet on esitetty prosentuaalisena muutoksena (+/-) kontrollikalojen suhteen siten, että kontrollikalojen arvo on asetettu 100 %:ksi.

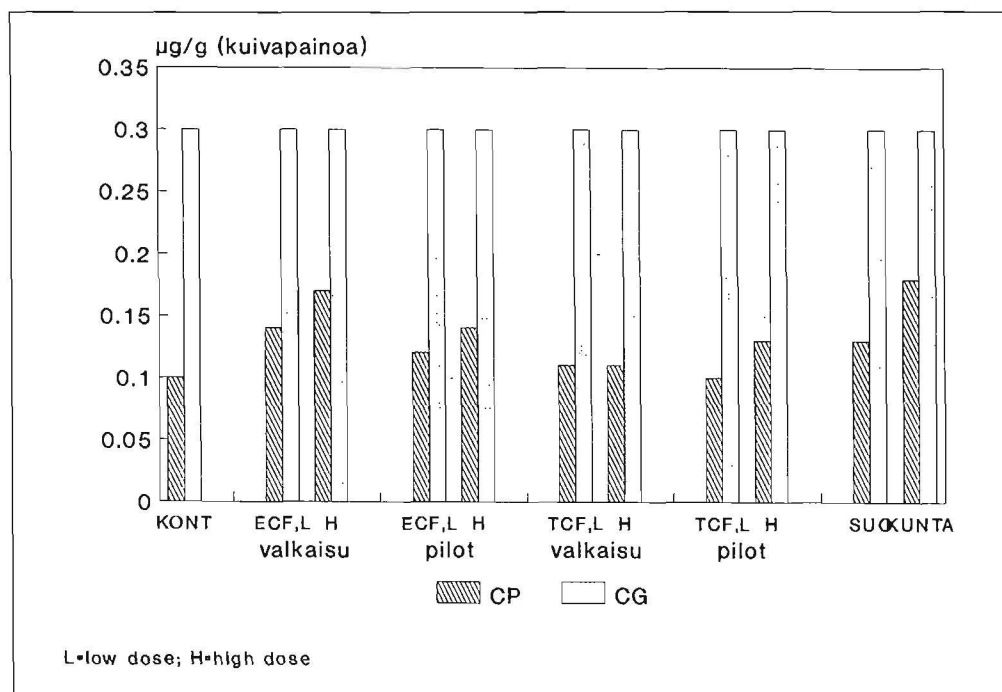
Analyysimenetelmät olivat samat kuin edellisissä malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehdyissä kala-altistuksissa (Lehtinen ym. 1992, 1993, Tana ym. 1994).

Tulokset

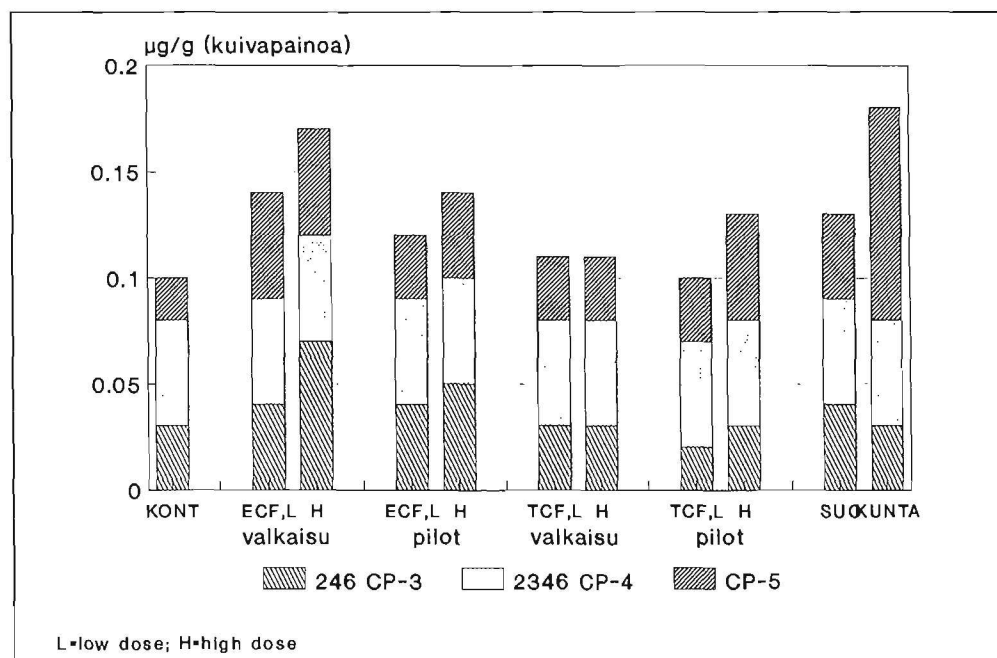
3.1 Sappianalyysit

Kalojen sapesta analysoitiin konjugoituneet kloorifenoliset yhdisteet ja uuteaineet (rasva- ja hartsihapot sekä sterolit) kalojen altistumisasteen määrittämiseksi. Sappianalyysit tehtiin Åbo Akademin puukemian laitoksella liitteessä 1 esitetyn menetelmän mukaisesti. Tulokset esitetään kuvissa 1 - 3.

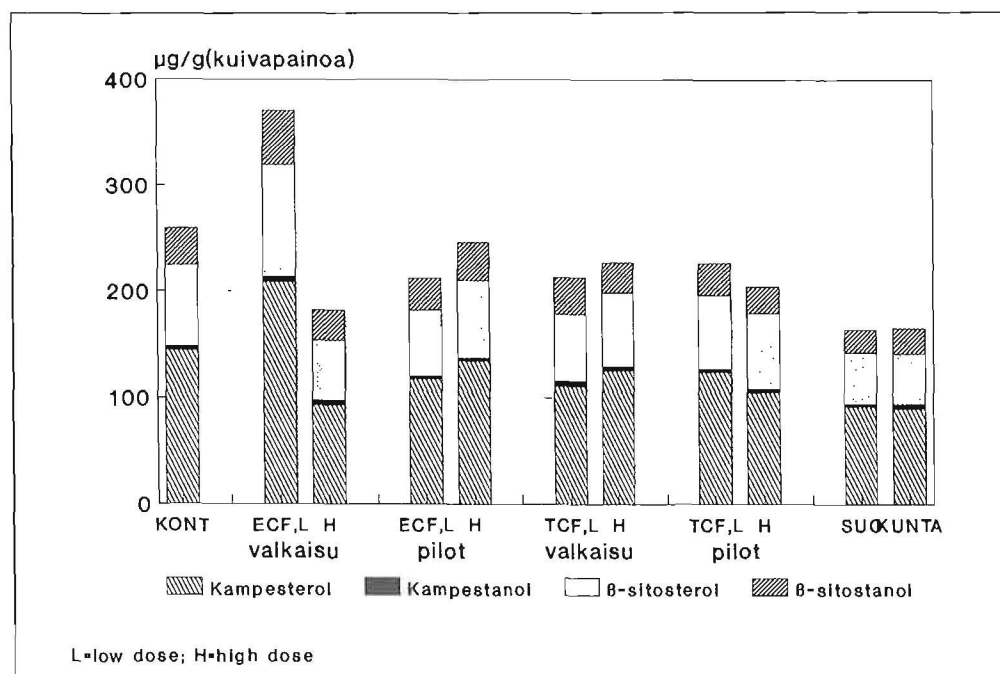
Konjugoituneita kloorifenolisia yhdisteitä ei esiintynyt merkittäviä määriä altistettujen kalojen sapessa (Kuva 1). Kloorifenolisten yhdisteiden pitoisuudet olivat luonnossa tavattavien tausta-arvojen tasolla, eikä ECF- ja TCF-jätevesille altistettujen kalojen välillä esiintynyt eroja. Klooriguajakolipitoisuudet olivat kaikissa ryhmissä, kontrolliryhmä mukaanluettuna, samoja, eikä missään ryhmässä todettu määritysrajan ylittäviä pitoisuuksia (Kuva 1). Tästä syystä kuvan 1 klooriguajakolipitoisuudet ovat kaikki samansuuruisia. Kloorifenolien osalta kaloissa, jotka oli altistettu käsittelemättömälle ECF-jätevedelle voitiin havaita lievää trikloorifenolipitoisuuden nousua (Kuva 2). Käsitellylle yhdyskuntajätevedelle altistetuissa kaloissa sapon pentakloorifenolipitoisuudet olivat muita ryhmiä suuremmat (Kuva 2). Altistusryhmien kalojen sapon kloorifenolisten yhdisteiden pitoisuudet olivat selvästi pienempiä kuin tämän projektin I vaiheessa lehtipuumassan tuotannosta aiheutuville jätevesille altistetuista kaloista tavatut vastaavat pitoisuudet (Sangfors ym. 1994). Kloorisyringoleja ei havaittu vuonna 1995 mäntymassantuotannosta aiheutuville jätevesille altistettujen kalojen sapesta.



Kuva 1. Kirjolohien sapesta analysoitujen konjugoituneiden kloorifenolisten yhdisteiden pitoisuudet (µg/g kuivapainoa) 8 altistusviikonjälkeen. CP = kloorifenolit; CG = klooriguajakolit, 0.3 = määritysraja.



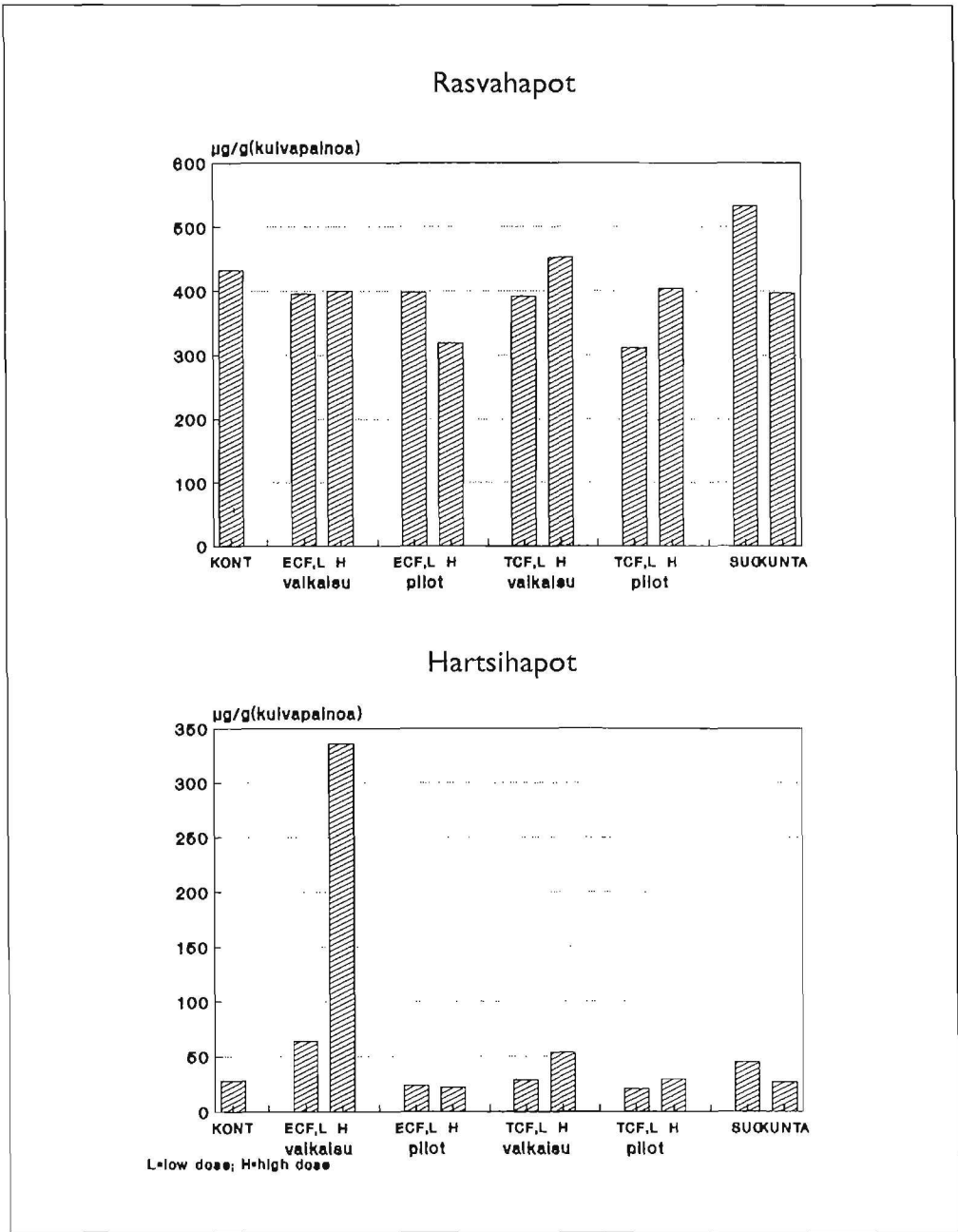
Kuva 2. Kirjolohi sapesta analysoidujen konjugoituneiden kloorifenolien pitoisuudet (µg/g kuivapainoa) 8 altistusviikon jälkeen.



Kuva 3. Kirjolohi sapesta analysoidujen kasvisterolien kokonaispitoisuudet (µg/g kuivapainoa) 8 altistusviikon jälkeen.

Kasvisterolien pitoisuudet jätevesille altistettujen kalojen sapessa olivat käsittelemättömälle ECF-valkaisuvedelle suuremmassa laimennuksessa (1:2000) altistettua ryhmää lukuunottamatta pienempiä kuin kontrolliryhmän kaloilla. Suo-vedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistetuista kaloista analysoidut kasvi-sterolipitoisuudet olivat yhtäsuuria ja ryhmien keskinäisessä vertailussa kaikkein pienimpiä.

Kalojen sapesta analysoitujen rasvahappopitoisuuksien välillä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja eri ryhmien välillä (Kuva 4). Korkeimmat pitoisuudet tavattiin suovedelle altistettujen kalojen sapesta. Alhaisimmat rasvahappopitoisuudet todettiin ryhmissä, jotka oli altistettu pilot-käsitellylle ECF-jätevedelle laimennuksessa 1:400 ja toisaalta pilot-käsitellylle TCF-jätevedelle laimennuksessa 1:2000. Tässä tutkimuksessa todetut kalojen saven rasvahappopitoisuudet olivat pienempiä kuin tämän projektin I-vaiheessa lehtipuumassan jätevesille altistetuista kaloista todetut pitoisuudet (Sangfors ym. 1994). Sytyke-projektin yhteydessä tehdyissä malliekosysteemikokeissa (Lehtinen ym. 1993) havupuusellun tuotannosta aiheutuvilla jätevesillä todettiin samaa tasoa olevia kalojen saven rasvahappopitoisuuksia kuin nyt raportoitavassa tutkimuksessa.



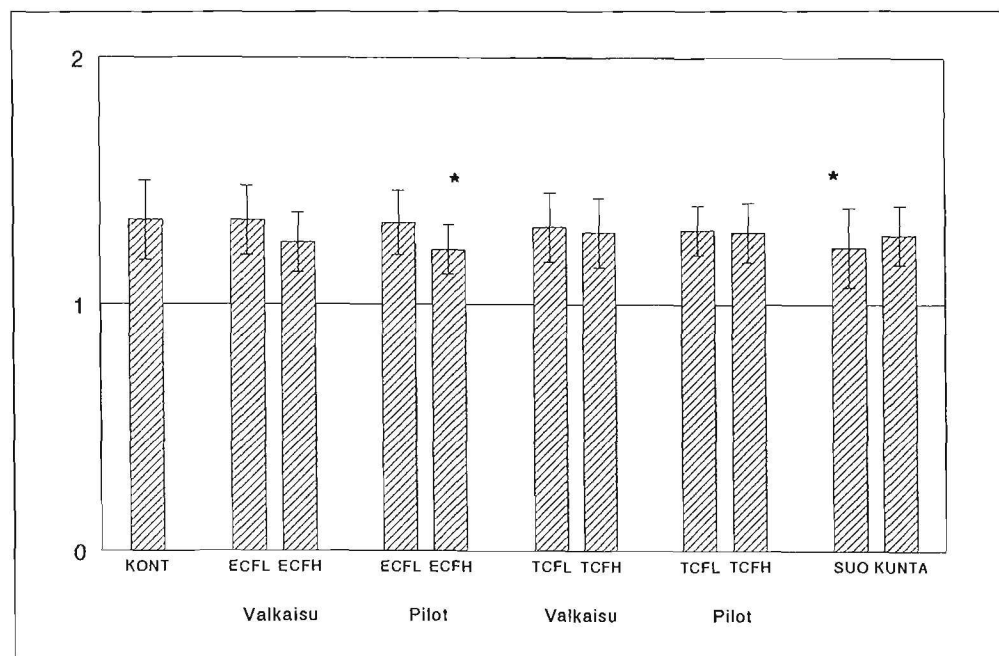
Kuva 4. Kirjolohen sapesta analysoitujen rasva- ja hartsihappojen (ei vapaat) pitoisuudet (µg/g kuivapainoa) 8 altistusviikon jälkeen.

Altistettujen kalojen sapesta analysoitujen konjugoituneiden hartsihappojen kokonaispitoisuudet (Kuva 4) olivat, käsittelemättömälle ECF-valkaisujätevedelle altistetuista kaloista todettuja pitoisuuksia lukuunottamatta, pieniä ja jopa pienempinä kuin kenttätutkimusten yhteydessä vertailualueilta pyydytyistä kaloista todettut pitoisuudet (Tana ym. 1988, Tana & Lehtinen 1989, 1995, Oikari & Holmbom 1986). Käsittelemättömälle ECF-valkaisujätevedelle altistettujen kalojen sapesta analysoiduista hartsihapoista esiintyi eniten pimaari- ja isopimaarihappoa sekä dehydroabietiini-happoa. Åbo Akademin (J. Hemming suullinen tieto) mukaan hartsihappojen kokonaispitoisuus < 30 mg/g kuivapainoa vastaa analytyttistä taustatasoa.

3.2 Morfometria

Morfometrinen tutkimus tulokset on esitetty taulukossa 3 ja kuvissa 5-6. Altistettujen kalojen keskimääräisessä pituudessa ja painossa 8 altistusviikon jälkeen ei todettu tilastollisesti merkitseviä eroja kontrollikaloihin verrattuna. Kalojen somaattisessa painossa (paino ilman sisäelimiä) ei myöskään todettu merkitseviä eroja. Maksan somaattinen indeksi (LSI), joka kuvaa maksan suhteellista painoa kalan kokonaispainoon, oli samanlainen eri altistusryhmissä, eikä altistuksella eri jätevesille ole ollut vaikutusta kalojen maksan suhteelliseen kokoon.

Kalojen kuntoa kuvaava kuntokerroin (CF), joka määritetään kalan painon ja pituuden suhteen perusteella, oli kontrolliryhmää tilastollisesti merkittävästi pienempi käsitellylle ECF-jätevedelle (suurempi altistuspitoisuus HD) ja suovedelle altistetuissa ryhmissä (Kuva 5). Muissa ryhmissä kalojen kuntokertoimissa ei eri altistusryhmien välillä esiintynyt merkitseviä eroja.



Kuva 5. Eri altistusryhmien kalojen kuntokerroin 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys * = $P < 0.05$. Valkaisu tarkoittaa käsittelemättömää jätevetä ja pilot käsiteltyä jätevetä. L = Low dose (1:2000) ja H = High dose (1:400).

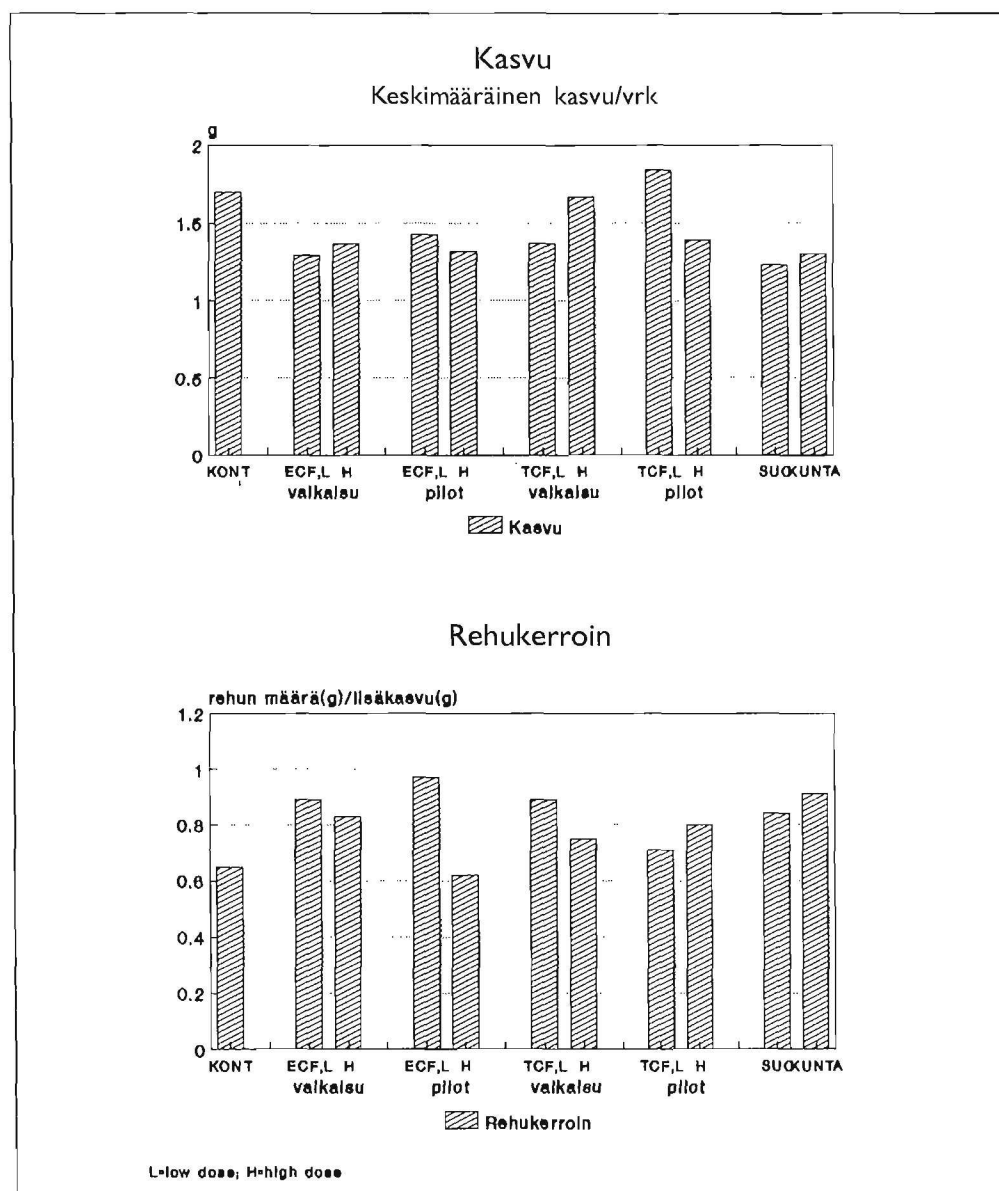
Taulukko 3. ECF- ja TCF-valkaisu-jätevesille sekä suovedelle ja yhdyskunta-jätevedelle altistettujen kalojen morfometriset arvot (keskiarvo±S.D.) 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys * = P<0.05.

| Ryhmä | Pituus,(cm) | Paino, (g) | LSI, (%) | CF |
|--------------------------|-------------|------------|----------|-----------|
| Kontrolli | 27.5±2.3 | 287±82 | 1.3±0.2 | 1.3±0.2 |
| ECFvalkaisu low dose | 27.4±2.1 | 277±74 | 1.3±0.2 | 1.3±0.1 |
| ECFvalkaisu high dose | 28.2±2.4 | 291±99 | 1.3±0.3 | 1.3±0.1 |
| ECFpilot low dose | 27.1±2.0 | 271±74 | 1.3±0.2 | 1.3±0.1 |
| ECFpilot high dose | 27.6±2.3 | 264±74 | 1.2±0.2 | 1.2±0.1 * |
| TCFvalkaisu low dose | 26.8±1.5 | 258±63 | 1.3±0.2 | 1.3±0.1 |
| TCFvalkaisu hig dose | 27.6±2.6 | 280±90 | 1.2±0.2 | 1.3±0.1 |
| TCFpilot low dose | 28.8±2.2 | 317±86 | 1.3±0.2 | 1.3±0.1 |
| TCFpilot high dose | 26.7±2.1 | 254±76 | 1.2±0.1 | 1.3±0.1 |
| SUO | 26.8±2.4 | 242±74 | 1.2±0.3 | 1.2±0.2 * |
| KUNTA | 27.4±2.0 | 266±57 | 1.2±0.2 | 1.3±0.1 |

Kalojen keskimääräinen kasvu altistuksen aikana laskettiin kunkin ryhmän biomassan lisäyksen perusteella, koska kaloja ei oltu yksilöllisesti merkitty eikä siten myöskään voitu seurata kalojen yksilöllistä kasvua. Kalojen keskimääräinen vuorokautinen kasvu sekä toisaalta rehukerroin, joka kuvaa annetun rehun määrää suhteessa biomassan lisäykseen, on esitetty kuvassa 6.

Laskelmien perusteella kalojen keskimääräinen kasvu oli altistusryhmissä pienempi kuin kontrolliryhmässä lukuunottamatta pilot-käsitellylle TCF-jätevedelle laimennuksessa 1:400 (HD) altistettua ryhmää. Erot kontrolliryhmään vaihtelivat välillä 2 - 30 %, ja suurimmat erot todettiin suo- ja yhdyskuntajätevedelle sekä toisaalta ECF-jätevedelle altistettujen ryhmien ja kontrolliryhmän välillä (Kuva 6).

Altistettujen kalaryhmien rehukertoimet olivat suuremmat kuin kontrolliryhmän (Kuva 6). Pilot-käsitellylle ECF-jätevedelle laimennuksessa 1:400 (HD) altistetun kalaryhmän rehukerroin oli yhtä suuri kuin kontrolliryhmän kaloilla. Pienempi kasvu yhdessä suurempien rehukertoimien kanssa eri altistusryhmissä on osoitus muutoksista kalojen energia-aineenvaihdunnassa, ja se voi johtua altistettujen kalojen huonommasta kyvystä hyödyntää rehun mukana saamaansa energiaa kasvuun. Ilmiö voi olla myös seurausta siitä, että jätevesille altistetut kalat hyödynsivät rehun mukana saamaansa energiaa muihin aineenvaihdunta-toimintoihin kuin kasvuun.



Kuva 6. Altistettujen kalojen keskimääräinen vuorokautinen kasvu järeuhukertoimet 8 altistusviikon aikana. Merkkien selitykset, ks. kuva 5.

3.3 Hematologia

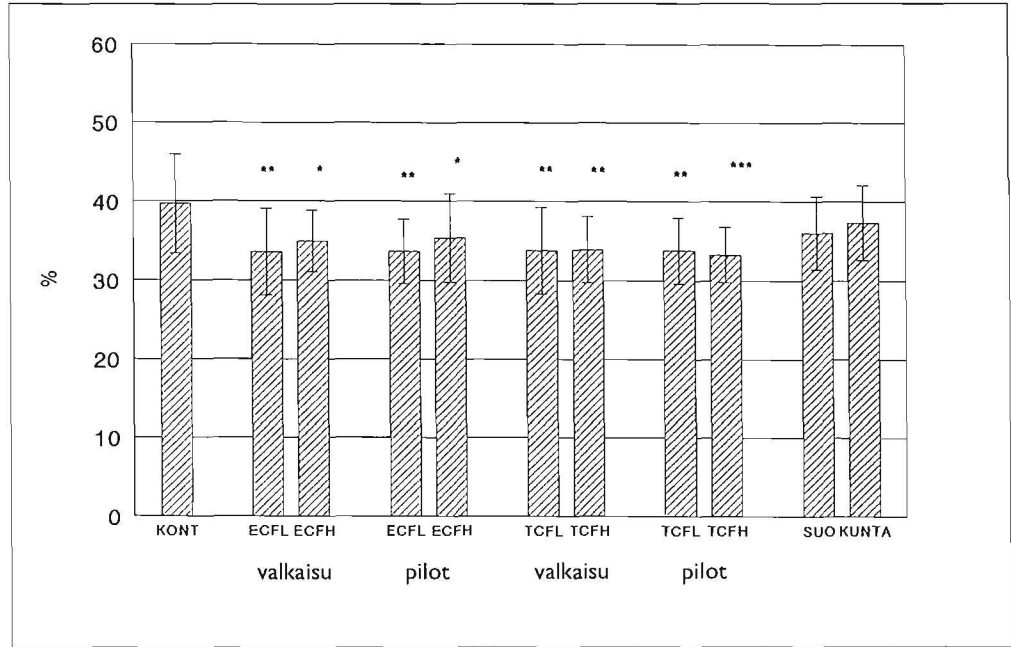
Hematologisten tutkimusten tulokset on esitetty taulukossa 3 ja kuvissa 7 - 9.

Metsäteollisuuden jätevesille altistettujen kalojen hematokriitti- (Hct) (Kuva 7) ja hemoglobiiniarvot (Hb) (Kuva 8) olivat merkittävästi pienempiä kuin kontrolli-kalojen vastaavat arvot. Sen sijaan suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistettujen kalojen veren hapenkuljetuskykyä (Hct,Hb) kuvaavat arvot eivät poikenneet kontrollikalojen arvoista.

Vaikka ECF- ja TCF-jätevesille altistettujen kalojen veri-arvot olivatkin kontrollikaloja pienemmät, arvot olivat kuitenkin luonnollisen vaihtelun piirissä (Monfelt & Härdig 1994). Veriarvot eivät myöskään anna aiheuttaa olettaa, että kalojen hapenkuljetuskyky olisi missään altistusryhmässä ratkaisevasti heikentynyt. Kalojen hemoglobiini-pitoisuuksien pienentyminen lienee seurausta punasolujen mää-

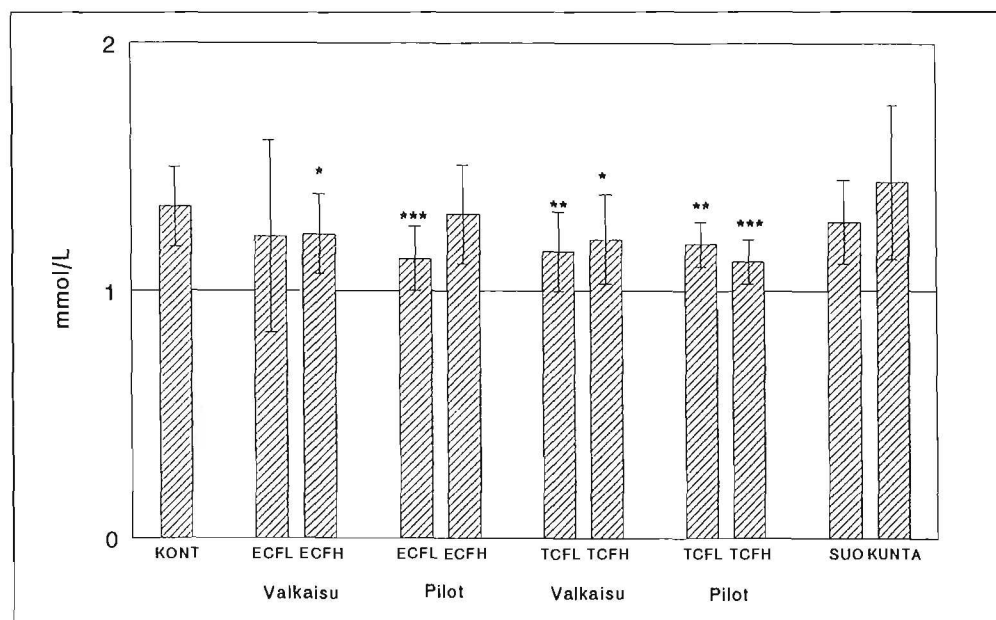
Taulukko 4. ECF- ja TCF-valkaisu- ja suodattajajätevesille sekä suodattajajätevedelle ja yhdyskunta- jätevedelle altistettujen kalojen hematologiset arvot (keskiarvo±S.D.) 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys: * = P<0.05; ** = P<0.01; *** = P<0.001.

| RYHMÄ | Hematokriitti % | Hemoglobiini mmol/L | MCHC mmol/L | Leukokriitti % |
|--------------------------|--------------------|------------------------|----------------|-------------------|
| Kontrolli | 39±6.3 | 1.3±0.2 | 3.4±0.7 | 1.01±0.17 |
| ECFvalkaisu low dose | 40±6.3 | 1.3±0.2 | 3.4±0.6 | 1.03±0.18 |
| ECFvalkaisu high dose | 34±5.5 ** | 1.2±0.4 ** | 3.5±0.5 | 0.84±0.16 |
| ECFpilot low dose | 34±4.1 ** | 1.1±0.1 *** | 3.4±0.7 | 0.92±0.13 ** |
| ECFpilot high dose | 35±5.6 * | 1.3±0.2 | 3.7±0.8 | 1.03±0.11 |
| TCFvalkaisu low dose | 34±5.5 ** | 1.2±0.2 ** | 3.4±0.5 | 1.06±0.22 |
| TCFvalkaisu high dose | 34±4.2 ** | 1.2±0.2 * | 3.6±0.6 | 0.91±0.11 * |
| TCFpilot low dose | 34±4.2 ** | 1.2±0.2 ** | 3.5±0.7 | 0.77±0.20 *** |
| TCFpilot high dose | 33±3.5 *** | 1.1±0.1 *** | 3.4±0.5 | 0.81±0.18 ** |
| SUO | 36±4.6 | 1.3±0.2 | 3.6±0.7 | 0.86±0.15 ** |
| KUNTA | 37±4.7 | 1.4±0.3 | 3.9±1.0 | 0.89±0.21 |



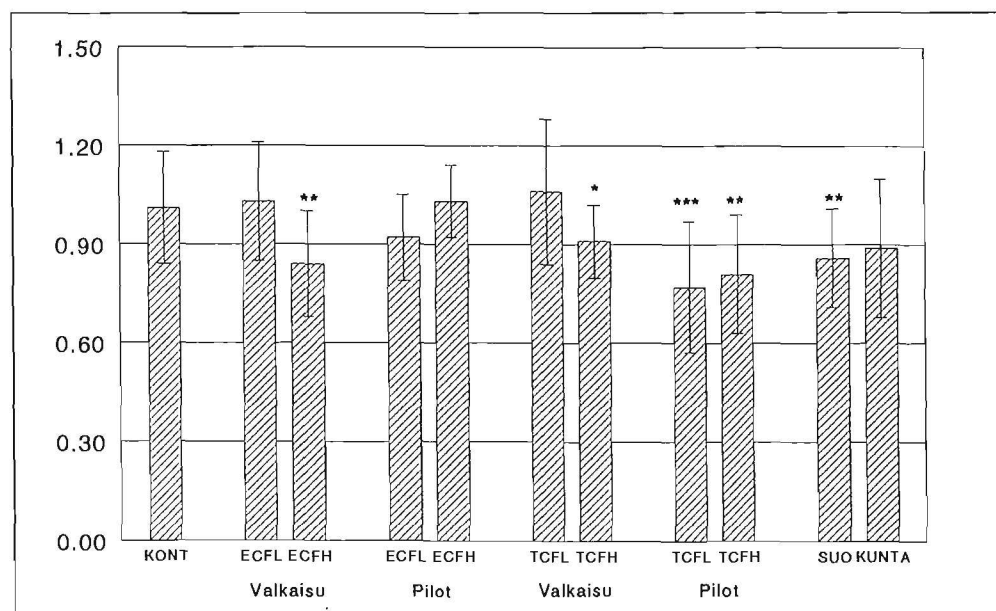
Kuva 7. Altistettujen kalojen hematokriittiarvot (Hct) 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys: * = P<0.05; ** = P<0.01; *** = P<0.001. Merkkien selitykset, ks. kuva 5.

rän pienentymisestä, koska punasolujen keskimääräisissä hemoglobiini-pitoisuuksissa (MCHC, taulukko 4) ei todettu tilastollisesti merkitseviä eroja. Kaloista mitatut hematokriittiarvot ja hemoglobiinipitoisuudet olivat yhtä suuria ja samalla tasolla kuin aikaisemmissa malliekosysteemikokeissa todetut vastaavat arvot (Lehtinen ym. 1993, Sangfors ym. 1994, Tana ym. 1994).



Kuva 8. Altistettujen kalojen hemoglobiinipitoisuudet (Hb) 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys: * = $P < 0.05$; ** = $P < 0.01$; *** = $P < 0.001$. Merkkien selitykset, ks. kuva 5.

Kalojen veressä olevien valkosolujen prosentuaalista osuutta kuvaavissa leukokriitti-arvoissa oli merkitsevä ero käsitellylle TCF-jätevedelle, suovedelle ja käsittelemättömälle ECF-jätevedelle (laimennus 1:400) altistettujen kalojen ja kontrollikalojen välillä (Kuva 9). Leukokriittiarvojen pienentyminen saattaa heijastaa kalojen vastustuskyvyn heikkenemistä (Mattsson ym. 1996), mutta toisaalta kaloissa ei altistuksen jälkeen näyteenoton yhteydessä tehdyssä makroskooppisessa tarkastelussa todettu tähän viittaavia oireita. Kalat olivat ulkoisesti hyväkuntoisia eikä niissä ollut merkkejä esim. bakteerien aiheuttamista infektoista kuten evärutosta.

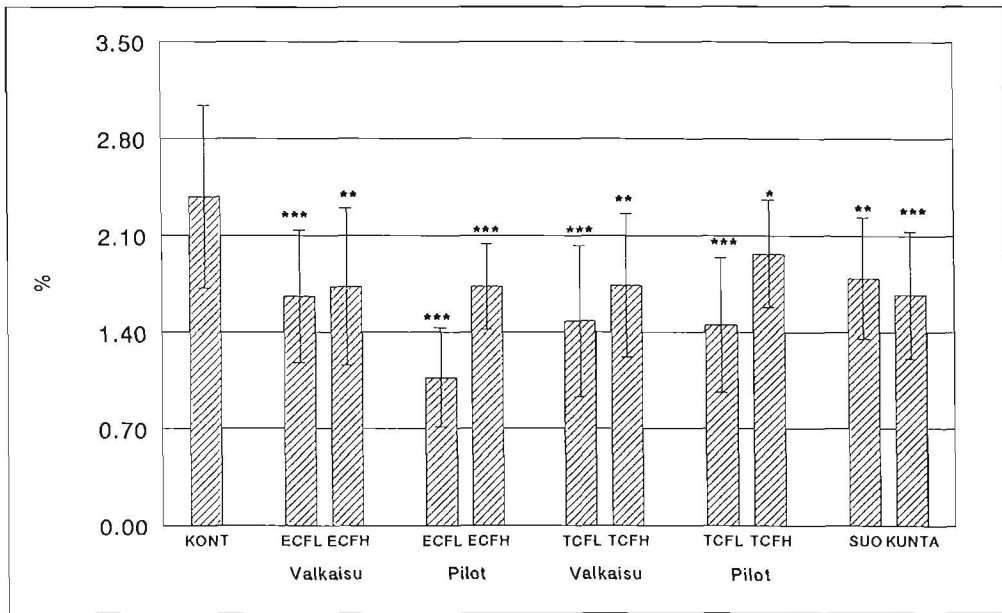


Kuva 9. Altistettujen kalojen valkosolujen prosentuaalinen osuus veressä (leukokriitti) 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys: * = $P < 0.05$; ** = $P < 0.01$; *** = $P < 0.001$. Merkkien selitykset, ks. kuva 5.

3.4 Maksan toiminta

Maksan toimintaa kuvaavien muuttujien arvot on esitetty taulukossa 5 sekä kuvis-
sa 10 - 12. Kuten jo morfometriaosassa (3.2) todettiin, maksan koossa suhteessa koko
kalan kokoon (LSI) ei todettu mitään eroja altistettujen kalojen ja kontrollikalojen
välillä. Maksan glykogeenipitoisuuksissa esiintyi vaihtelua siten, että muutamissa
altistusryhmissä pitoisuudet olivat suurempia ja muutamissa pienempiä kuin vas-
taavat kontrolliryhmän arvot. Erot eivät kuitenkaan olleet niin suuria, että niillä
olisi ollut tilastollista merkitsevyyttä. Maksan glykogeeni-pitoisuuksien perusteella
kalojen hiilihydraattiaineenvaihdunassa ei ole tapahtunut altistuksesta johtuvia
vakavia muutoksia.

Altistettujen kalojen maksan lipidipitoisuudet olivat kaikissa altistustyhmissä
merkitsevästi kontrollikalojen vastaavia pitoisuuksia pienempiä (Kuva 10). Mak-
san lipidipitoisuuksien suhteen on myös todettava se, että ne olivat pienempiä suu-
remmassa laimennuksessa (1:2000) altistetuilla kaloilla kuin pienemmässä laimen-
nuksessa (1:400) altistetuilla kaloilla.

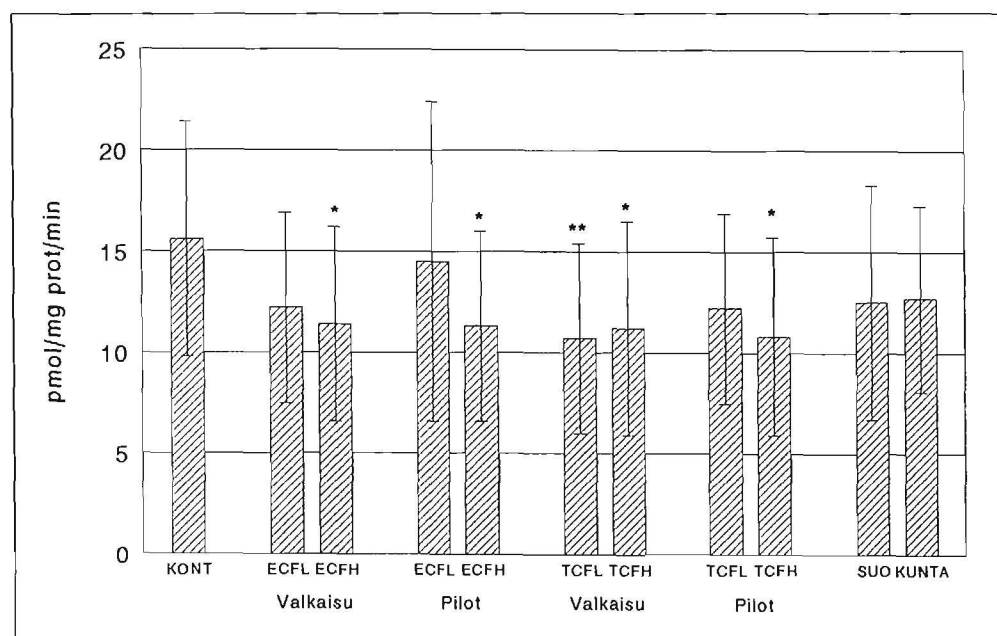


Kuva 10. Altistettujen kalojen maksan lipidipitoisuudet 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen
merkitsevyys: *= $P<0.05$; **= $P<0.01$; ***= $P<0.001$. Merkien selitykset ks. kuva 5.

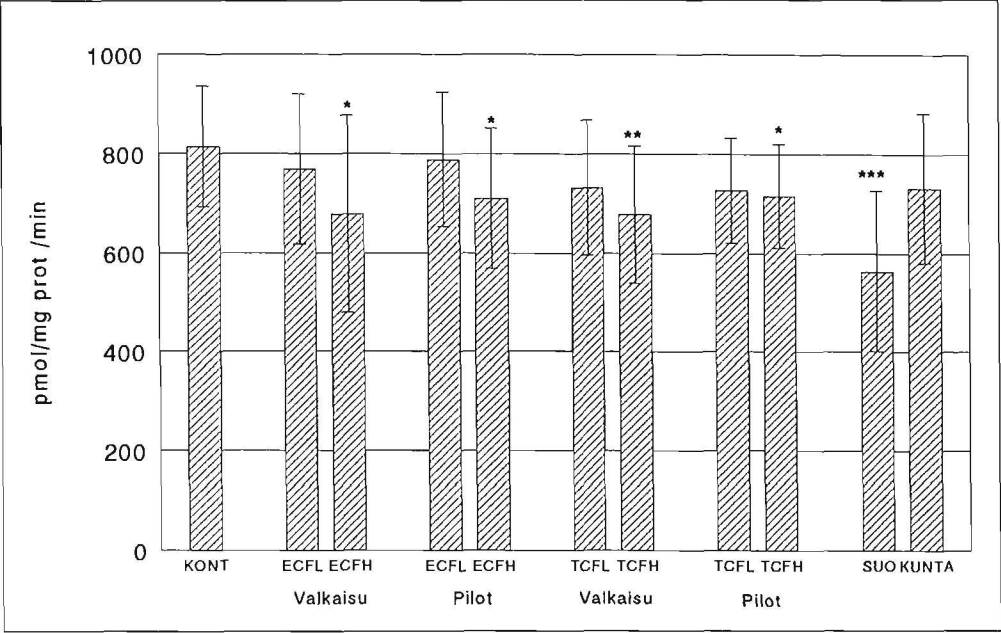
Maksan MFO-systeemiin kuuluvan hapetusaktiivisuutta mittaavan entsyymin
EROD (Kuva 11) sekä konjugaatioaktiivisuutta mittaavan entsyymin UDP-GT (Kuva
12) aktiivisuudet jätevesille, suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistetuissa ka-
loissa olivat pienempiä kuin kontrollikaloissa 8 altistusviikon jälkeen. ECF- ja TCF-
jätevesille altistetuissa kaloissa erot kontrollikaloihin olivat tilastollisesti merkit-
seviä. Valkaisujätevesille altistettujen kalojen entsyymiaktiivisuuksissa oli havait-
tavissa annosvasteisuutta. Suoveden osalta UDP-GT entsyymiaktiivisuuden pienen-
tyminen oli erittäin merkitsevää.

Taulukko 5. ECF- ja TCF-valkaisu-jätevesille sekä suovedelle ja yhdyskunta-jätevedelle altistettujen kalojen maksan toimintaa kuvaavat arvot (keskiarvo±S.D.) 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys: * = P<0.05; ** = P<0,01; *** = P<0.001.

| RYHMÄ | Glykogeni % | Lipidit % | EROD pmol/mgprot/min | UDP pmol/mgprot/min |
|--------------------------|----------------|----------------|-------------------------|------------------------|
| Kontrolli | 6.9±2.1 | 2.4±0.7 | 15.6±5.8 | 814±121 |
| ECFvalkaisu low dose | 6.7±2.7 | 1.7±0.5 *** | 12.2±4.7 | 768±151 |
| ECFvalkaisu high dose | 7.4±2.6 | 1.7±0.6 ** | 11.4±4.8 * | 678±198 * |
| ECFpilot low dose | 6.3±2.5 | 1.1±0.4 *** | 14.5±7.9 | 788±135 |
| ECFpilot high dose | 7.2±2.8 | 1.7±0.3 *** | 11.3±4.5 * | 710±141 * |
| TCFvalkaisu low dose | 7.6±2.9 | 1.5±0.6 *** | 10.7±4.7 * | 732±135 |
| TCFvalkaisu high dose | 6.5±2.1 | 1.7±0.5 ** | 11.2±5.3 * | 678±138 ** |
| TCFpilot low dose | 8.3±2.4 | 1.5±0.5 *** | 12.2±4.7 | 727±185 |
| TCFpilot high dose | 5.9±2.0 | 2.0±0.4 * | 10.8±4.9 * | 716±105 * |
| SUO | 5.8±1.8 | 1.8±0.4 ** | 12.5±5.8 | 564±163 *** |
| KUNTA | 6.8±1.8 | 1.7±0.5 *** | 12.7±4.6 | 732±150 |



Kuva 1 I. Altistettujen kalojen maksan EROD aktiivisuudet 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys: * = P<0.05; ** = P<0.01. Merkien selitykset, ks. kuva 5.



Kuva 12. Altistettujen kalojen maksan UDP-GT aktiivisuudet 8 altistusviikon jälkeen. Tilastollinen merkitsevyys: * = $P<0.05$; ** = $P<0.01$; *** = $P<0.001$. Merkien selitykset, ks. kuva 5.

4

Tulosten tarkastelu ja yhteenveto

Tämä kala-altistus on tehty malliekosysteemikokeiden yhteydessä ja kalat ovat altistuneet varsinaisista malliekosysteemialtaista ulosmenevälle vedelle. Samanlaisia tutkimuksia on tehty murtovesi- ja makeavesiympäristössä vuodesta 1984 ja tutkimuksissa on selvitetty sekä käsiteltyä että käsittelemättömiä sellutehtaan kokonais- ja valkaisu-jätevesiä. Malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehtävissä kalakokeissa kalat altistuvat jätevedelle, jota monet ekosysteemin biologiset toiminnot ovat mahdollisesti muuttaneet. Tähän liittyy esimerkiksi jätevesissä esiintyvien yhdisteiden mikrobiologinen hajoaminen ja muuntuminen.

Malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehtävät altistukset poikkeavat siten perinteisistä laboratorioaltistuksista, joissa kaloja altistetaan pumppaamalla jätevettä suoraan pelkästään kaloja sisältäviin altaisiin. Malliekosysteemikokeissa käytettävät jätevesi-laimennokset, jotka pyrkivät kuvaamaan olosuhteita tehtaan lähialueella ja toisaalta etäämpänä tehtaasta, ovat tavallisesti suurempia kuin laboratorioaltistuksissa käytettävät jätevesilaimennokset.

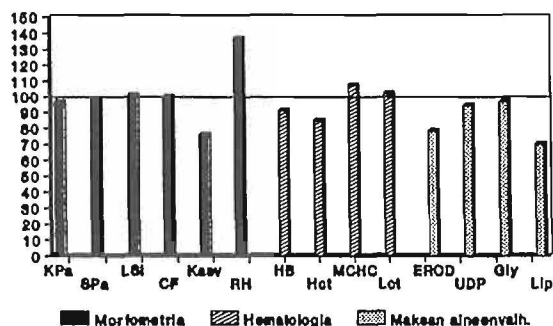
Altistuksen jälkeen kaloista tutkittiin suhteellisen laaja morfometrinen, fysiologinen ja biokemiallisten muuttujien kirjo. Lisäksi tutkimuksissa analysoitiin toisaalta sterolien ja muiden uuteaineiden sekä kloorifenolisten yhdisteiden pitoisuuksia kalojen sapesta määrittämään kalojen altistumisastetta. Kuvissa 13 - 14 on esitetty jätevesille altistettujen kalojen morfometrista ja fysiologista tilaa kuvaavien 14 tutkitun muuttujan prosentuaalinen ero kontrollikalojen vastaaviin arvoihin. Kunkin suureen kontrolli-ryhmän keskiarvolle on annettu arvo 100 % ja jätevesille altistettujen ryhmien vastaavien suureiden keskiarvo on suhteutettu prosentuaalisena (+/-) erona tähän lukuun.

Kemia

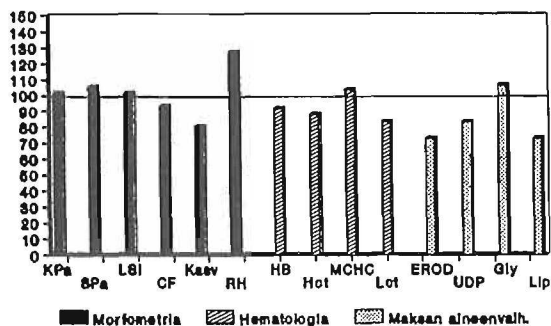
Kalojen sapesta analysoidut konjugoituneiden kloorifenolisten yhdisteiden ja uuteaineiden pitoisuudet olivat pieniä ja luonnossa metsäteollisuuden yläpuolisissa vesistöissä ja kenttätutkimusten vertailualueilla havaittavilla tasoilla (Oikari & Kunnamo-Ojala 1987; Landner ym. 1994). ECF- ja TCF-jätevesille altistettujen kalaryhmien välillä ei ainepitoisuuksissa voitu havaita merkittäviä eroja lukuunottamatta käsittelemättömälle ECF-valkaisu-jätevedelle altistettua ryhmää. Tässä ryhmässä kloorifenolisten yhdisteiden ja hartsihappojen pitoisuudet olivat korkeampia kuin muissa altistusryhmissä. Yhdyskuntajätevedelle altistetussa ryhmässä saven pentakloorifenolien pitoisuudet olivat selvästi muista kalaryhmistä mitattuja pitoisuuksia suuremmat. Suovedelle altistettujen kalojen sapesta analysoidut pitoisuudet olivat samalla tasolla kuin jätevesille altistetuissa kaloissa. Sapesta analysoitujen kasvisterolien kokonaispitoisuudet olivat jätevesille altistetuissa kaloissa samalla tasolla kuin kontrolliryhmässä. Suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistetuissa kaloissa saven kasvisterolipitoisuudet olivat keskenään yhtäsuuria, mutta pienempiä kuin muissa altistusryhmissä ja kontrolliryhmässä.

Tässä tutkimuksessa altistettujen kalojen sapesta analysoidut kloorifenolisten yhdisteiden ja uuteaineiden pitoisuudet olivat pienempiä kuin vastaavanlaisessa

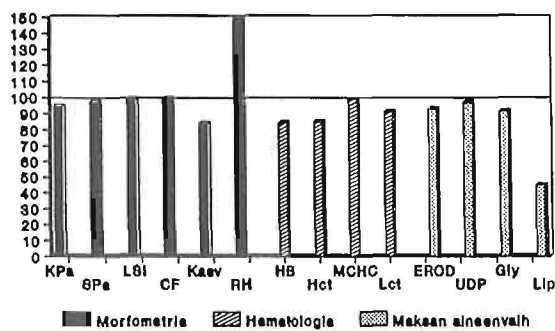
ECF, käsittelemätön
laimennus 1:2000



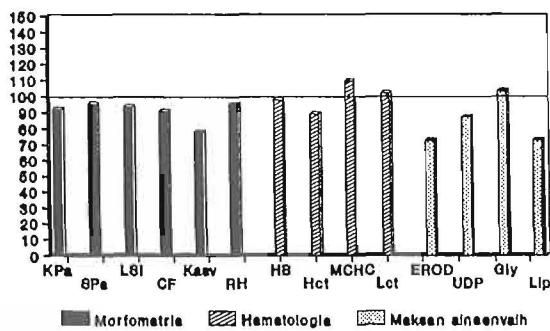
ECF, käsittelemätön
laimennus 1:400



ECF, pilot
laimennus 1:2000



ECF, pilot
laimennus 1:400



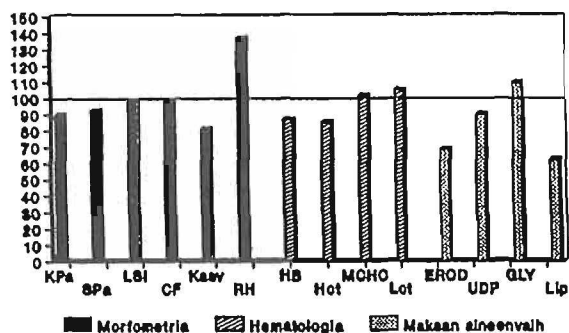
Kpa=kokonaispaino
SPa=somaattinen paino
LSI=maksan somaattinen indeksi
CF=kuntokerroin
Kasv=kesikääräinen kasvu
RH=rehukerroin

Hb=hemoglobiini
Hct= hematokriitti
MCHC=punasolujen keskim.
hemoglobiinipitoisuus
Lct=leukokriitti
EROD=maksan entsyymi
UDP=maksan entsyymi
Glyk=maksan glykogeeni
Lip=maksan lipidit

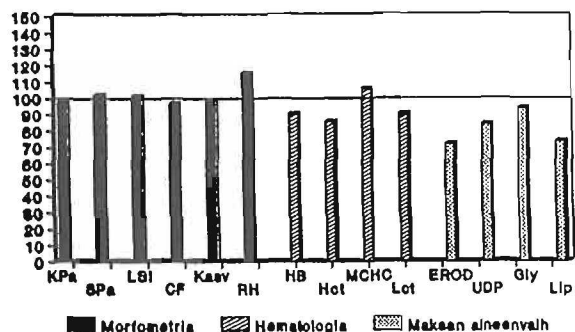
Kuva 13. ECF-valkaisujätevesille altistetuista kaloista tutkittujen kalafysiologisten muuttujien prosentuaalinen ero kontrollikaloihin.

altistuksessa (koko projektin vaihe I), joka tehtiin lehtipuumassan tuotannosta aiheutuvilla ECF- ja TCF-valkaisusta peräisin olevilla jätevesillä (Sangfors ym. 1994). Kalojen säpestä analysoitujen yhdisteiden ja toisaalta kaloista mitattujen fysiologisten vasteiden välillä ei todettu riippuvuutta.

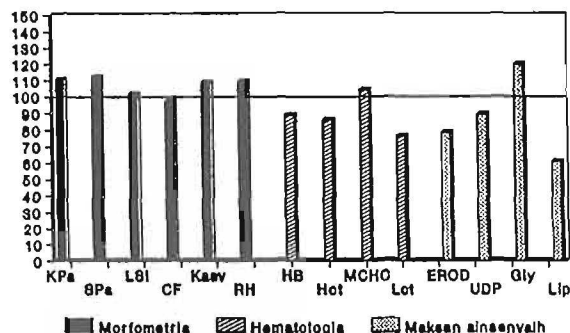
TCF, käsittelemätön
laimennus 1:2000



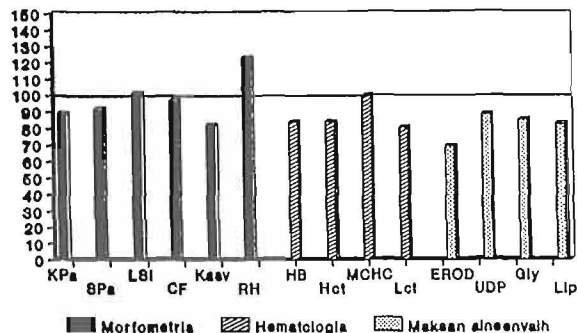
TCF, käsittelemätön
laimennus 1:400



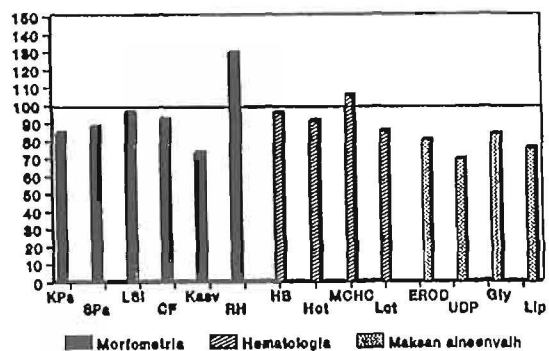
TCF, pilot
laimennus 1:2000



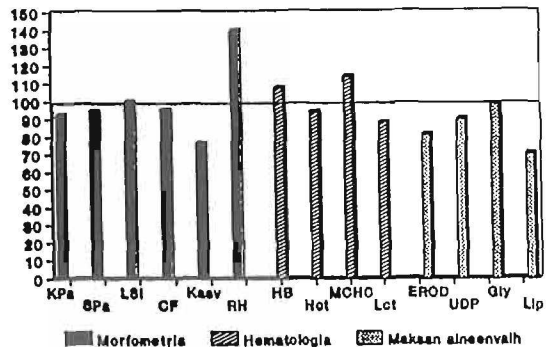
TCF, pilot
laimennus 1:400



Suovesi



Yhdyskuntavesi



Kuva 14. TCF-alkaisijätevesille, suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistetuista kaloista tutkittujen kalafysiologisten muuttujien prosentuaalinen ero kontrollikaloihin. Lyhenteet, ks. kuva 13.

Morfometria, kasvu, taudit ja sairaudet

Koekaloja ei kuollut missään ryhmässä altistuksen aikana. Näytteenoton yhteydessä tehdyssä kalojen makroskooppisessa tarkastelussa ei kontrollikaloissa eikä eri jätevesille altistetuissa kaloissa todettu merkkejä loisista tai kalataudeista. Sama tilanne oli suo- ja yhdyskuntajätevedelle altistuissa kaloissa. Kalojen iho oli kaikissa ryhmissä hyväkuntoinen eikä evissä ollut merkkejä kulumista tai bakteerien aiheuttamista tulehduksista. Kalojen sisäelimet olivat hyväkuntoisia eikä esimerkiksi maksojen koossa eri altistusryhmien välillä todettu eroja.

Kalojen kuntokerrointen mukaan altistus jätevesille sekä suo- ja yhdyskuntajätevedelle ei ollut heikentänyt kaloja. Altistettut kalat kasvoivat kuitenkin vähemmän kuin kontrollikalat 8 altistusviikon aikana ja niiden rehukertoimet olivat suurempia kuin kontrollikaloilla. Tämä viittaa siihen, että altistettut kalat eivät ole pystyneet hyödyntämään rehun sisältämää energiaa kasvuun samalla tavoin kuin kontrollikalat tai sitten altistus on aiheuttanut lisääntynyttä energian tarvetta muissa elintoiminnoissa. Energiatarpeen lisääntymiseen viittäisi myös se, että altistetuilla kaloilla oli vähemmän rasvaa sisäelinten ympärillä kontrollikaloihin verrattuna ja, että ne siten olisivat käyttäneet osan rasvakudoksestaan energiatarpeen tyydyttämiseen (Lehtinen ym. 1993).

Tämän projektin I vaiheen tutkimuksissa (Sangfors ym. 1994), jossa kaloja altistettiin lehtipuumassan tuotannosta aiheutuville valkaisu- ja jätevesille todettiin kalojen kasvun ja rehukerrointen suhteen päinvastainen ilmiö. Ensimmäisen vaiheen tutkimuksissa altistettujen kalojen todettiin kasvavan paremmin ja niiden rehukertoimien olevan pienempiä kuin kontrollikaloilla. Lehtipuumassan ECF- ja TCF-tuotannosta aiheutuvilla jätevesillä tehdyissä malliekosysteemitutkimuksissa on toisaalta havaittu myös kalojen kasvun vähenemistä yhdessä rehukerrointen suurentumisen kanssa (Lehtinen & Tana 1996). Nyt tehdyn malliekosysteemi-tutkimuksen ja toisaalta aikaisemmista malliekosysteemitutkimuksista saatujen tulosten perusteella ei voida osoittaa selvää jätevesien aiheuttamaa ja kalojen kasvuun kohdistuvaa vaikutusmallia. Sen sijaan on selvää, että jätevesialtistuksilla on vaikutusta kalojen energia-aineenvaihduntaan, joka ilmenee eri asteisina muutoksina kalojen kasvussa ja energiavarannoissa. ECF- ja TCF-valkaisuista peräisin olevien jätevesien aiheuttamat vaikutukset eivät näiden tutkimusten perusteella ole poikenneet toisistaan. Kalojen sapesta analysoitujen konjugoituneiden yhdistepitoisuuksien ja kalojen kasvuun kohdistuvien vaikutustusten välillä ei pystytty osoittamaan riippuvuutta. Tästä voidaan tehdä se johtopäätös, että kloorifenolisilla yhdisteillä ja hartsihapoilla ei nykyisissä jätevesipitoisuuksissa ole suoranaista vaikutusta kalojen kasvuun.

Hematologia

Altistetuilla kaloilla oli pienemmät hematokriittiarvot ja pienemmät veren hemoglobiinipitoisuudet kuin kontrollikaloilla. Tämä on todennäköisimmin seurausta verisolujen määrän pienentymisestä. Altistettujen kalojen punasolujen keskimääräinen hemoglobiinipitoisuus (MCHC) oli kuitenkin suurentunut kontrollikaloihin verrattuna. Verisolujen määrän pienentymisestä aiheutuva veren mahdollinen hapenkuljetuskyvyn heikkeneminen on siten kompensoitu lisäämällä solujen keskimääräistä hemoglobiini-pitoisuutta. Toisaalta punasolujen ja hemoglobiinipitoisuuden pienentyminen voi johtua myös plasman ja kudosten vesipitoisuuden suurentumisesta (Larsson ym. 1986). Altistettujen kalojen veri- ja kudokset olivat kuitenkin luontaisen vaihteluvälin puitteissa (Monfelt & Hårdig 1994) ja kaiken lisäksi sen yläpäässä, joten kalojen hapenkuljetuskyvyn voidaan katsoa olleen hyvän.

Veren valkosolujen prosentuaalisen osuuden (leukokriitti) ja siten valkosolujen määrän lisääntyminen on yleensä osoitus bakteeri- tai virusperäisestä tulehduksesta tai kudolvauriosta. Tässä tutkimuksessa altistetuista kaloista mitatut veren leukokriittiarvot olivat kontrollikalojen arvoja pienemmät. Muutamissa altistusryhmissä leukokriittiarvojen pientyminen (TCF-pilot; ECF-valkaisu, HD; suovesi Kuva 9) oli merkittävää ja voi olla osoitus altistuksen aiheuttamasta rasituksesta ja vastustuskyvyn heikkenemisestä (McLeay & Gordon 1977). Kaloista ei kuitenkaan löydetty muita vastustuskyvyn heikkenemistä kuvaavia oireita. Vastaavanlaista valkosolujen määrän vähentymistä todettiin myös altistettaessa kaloja lehtipuumassan tuotannosta aiheutuville ECF- ja TCF-valkaisujätevesille ilman, että mitään selvää syytä voitiin esittää valkosolujen määrän muutoksille (Sangfors ym. 1994). Havupuumassan ja lehtipuumassan tuotannosta aiheutuvista jätevesistä pilot-laitoksessa käsitelty TCF-valkaisujätevesi aiheutti suurimmat pientymiset valkosolujen määrässä.

Maksan toiminta

Maksan aineenvaihduntaa kuvaavissa muuttujissa todettiin merkittävimmät muutokset altistettujen kalojen ja kontrollikalojen välillä maksan lipidi- pitoisuuksissa, jotka olivat altistetuilla kaloilla merkittävästi pienempiä. Altistettujen kalojen lipidipitoisuuksien pientyminen on seurausta siitä, että kalat ovat vapauttaneet energiaa maksan muihin aineenvaihduntatoimintoihin kuluttamalla maksan rasvavarantoja. Lipidipitoisuuksien negatiiviseen annosvasteisuuteen ei voida antaa perusteltua selitystä. Toisen maksan aineenvaihduntaa kuvaavan muuttujan l. glykogeenin pitoisuuksissa tapahtuneet muutokset eivät olleet yhtä merkittäviä ja johdonmukaisia kuin muutokset lipidipitoisuuksissa.

Maksan entsyymiaktiivisuudet olivat altistetuissa kaloissa pienemmät kuin kontrollikaloissa. Erot kontrollikalojen suhteen olivat 20-30 %, joten useamman kertaluokan eroista ei ollut kyse, vaikka tilastollista merkitsevyyttä esiintyikin. Myös suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle altistuneiden kalojen maksan entsyymiaktiivisuudet olivat alentuneet. Konjugaatioentsyymi UDP-GT:n aktiivisuuksien on aikaisemmin todettu pienenevän altistettaessa kaloja TMP-jätevesille ja kasvisteroleille (Lehtinen ym. 1993) sekä hartsihapoille (Oikari & Nakari 1982; Tana 1988). Sen sijaan nykyaikaisten sulfaattiselutehtaiden jätevesille altistettaessa muutokset kalojen maksan UDP-GT-aktiivisuuksissa ovat olleet vähäisiä ja yleensä vailla tilastollista merkitsevyyttä (Lehtinen ym. 1992, Grahn & Grotell 1994; Sangfors ym. 1994). Nyt tehdyssä tutkimuksessa merkittävin UDP-GT-aktiivisuuden vähentyminen todettiin suovedelle altistetuissa kaloissa. Kalojen sapesta tehtyjen analyysien perusteella entsyymi-aktiivisuuksien alenemat eivät ole olleet seurausta kalojen kohonneista kloorifenoli- hartsihappo- tai sterolipitoisuuksista. Jätevesistä sekä suo- ja yhdyskuntajätevedestä tehdyn kemiallisen karakterisoinnin (Mikkelsen & Paasivirta 1996) perusteella riippuvuutta voisi esiintyä UDP-GT-aktiivisuuden alentumisen ja fenoli-fraktiossa esiintyvien yhdisteiden välillä suoveden osalta. Suovedessä näitä yhdisteitä esiintyi selvästi enemmän kuin jätevesissä. Muiden fraktioiden (neutraali-, anisoli- ja happofraktio) sisältämien yhdisteiden määrän ja UDP-GT-aktiivisuuden välillä ei havaittu riippuvuutta.

Kalojen maksan EROD-aktiivisuutta on perinteisesti pidetty metsäteollisuuden jätevesille altistumisen bioindikaattorina (Södergren 1988; Lindström-Seppä 1990; Hodson 1992), ja aktiivisuuden on yleensä todettu yleensä lisääntyvän altistuneissa kaloissa (Lehtinen 1996). Nyt tehdyssä tutkimuksessa todettiin kuitenkin havupuumassan tuotannosta aiheutuvien ECF- ja TCF-valkaisujätevesien aiheuttavan EROD-aktiivisuuden pientymistä altistuneissa kaloissa. Eräissä muissakin viimeaikaisissa tutkimuksissa (Sangfors ym. 1994; Grahn & Grotell 1994) on todettu nykyaikaisista ECF- ja TCF-valkaisua käyttävistä tehtaista peräisin olevien jäte-

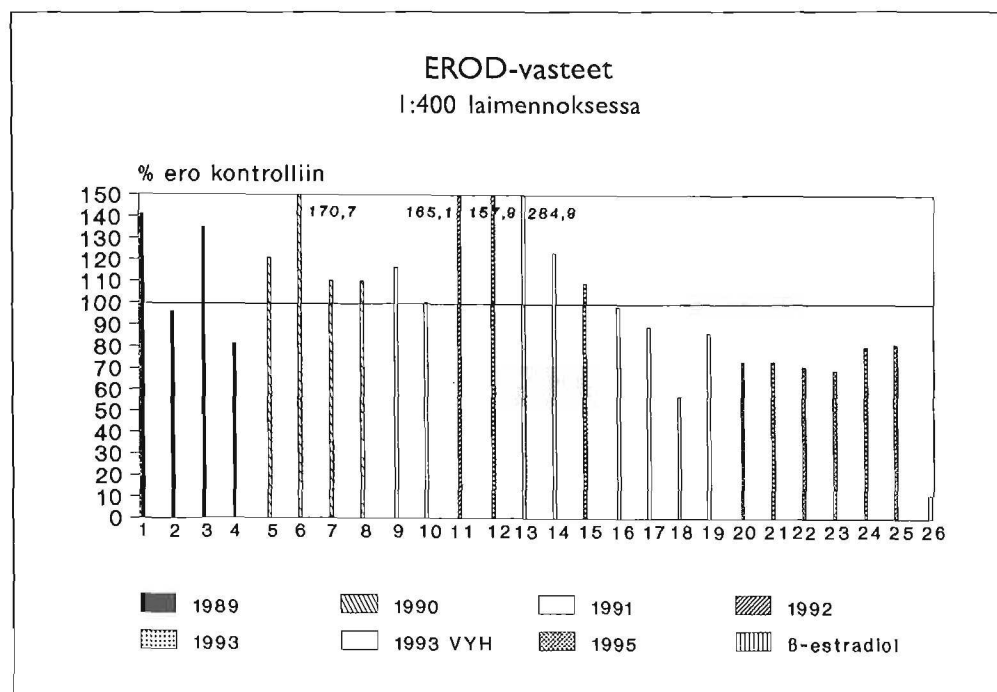
vesien aiheuttavan kaloissa EROD-aktiivisuuden pienentymistä, mutta myöskin suurentumista (Lehtinen & Tana 1996). Kenttätutkimuksissa on myös todettu kalojen EROD-aktiivisuuden pienentymistä tehtaan alapuolisessa vesistössä (Tana & Lehtinen 1995). Pienentyminen oli suoraan verrannollista etäisyyteen tehtaasta, mutta tähän saattaa myös olla vaikuttamassa veden humuspitoisuus, joka lisääntyi siirryttäessä kauemmaksi alavirtaan tehtaasta. Nämä havainnot ovat omiaan kyseenalaistamaan tämän entsyymien toimimisen bioindikaattorina ainakin altistumisessa nykyaikaisten sellutehtaiden jätevesille. Aikaisemminkin on jo todettu, että fysiologisten, toksikologisten ja muiden ympäristötekijöiden osuus on ymmärrettävä, jotta todetut vasteet voidaan tulkita oikein (Jimenez ym. 1990; Mattsson m. 1996).

Altistettujen kalojen sapesta analysoitujen konjugoitujen yhdisteiden ja maksan EROD-aktiivisuuden pienentymisen välillä ei voitu todeta riippuvuutta. Tutkittujen vesien kemiallisen karakterisoinnin yhteydessä havaittujen eri fraktioiden sisältämien yhdisteiden kokonaismäärien ja EROD-aktiivisuuden välillä ei myöskään havaittu riippuvuutta. Toisaalta entsyymiaktiivisuuksissa todetut muutokset kontrollikaloihin verrattuna esiintyivät sekä käsittelemättömille että käsitellyille jätevesille altistetuissa kaloissa, joten jäteveden käsittely ei poistanut EROD-vastetta, vaikka yhdisteiden määrät jätevedessä pienenevät käsittelyn jälkeen.

Tutkimusten perusteella nykyiset sulfaattisellutehtaan valkaisu-jätevedet, riippumatta EFC- tai TCF-valkaisusta, eivät aiheuta maksan MFO-systeemiin kuuluvan hapetusaktiivisuutta mittaavan EROD:n aktiivisuuden lisääntymistä (Kuva 15). Kuvassa 15 on esitetty sulfaattisellutehtaan valkaisu- ja kokonaisjätevesillä tehtyjen malli-ekosysteemikokeiden yhteydessä tehdyissä kala-altistuksissa mittattujen EROD-aktiivisuuksien prosentuaalisia eroja kontrollikaloiden aktiivisuuteen. Kuvan 15 esittämistä jätevesistä numerot 12 ja 16 sekä jätevedet 14 ja 18 ovat peräisin samasta tehtaasta eri aikoina kerätystä jätevesinäytteestä saman valkaisu-jakson aikana. EROD-aktiivisuuksien erilaisuus ko. altistuksissa korostaa muiden kuin itse valkaisu-merkitystä todettuihin vasteisiin. Mainittakoon, että entsyymianalyysit kummassakin 1993 vuoden tutkimuksessa on tehty samassa laboratoriossa. Kuvan 15 pylväs 26 kuvaa EROD-vastetta kaloissa, joille annettiin 17- β -estradiolia intraperitoneaalisesti pitoisuudessa 20 mg/kg kalaa 14 ja 7 vuorokautta ennen näytteenottoa.

Viimeaikaisten prosessimuutosten ja jäteveden käsittelylaitosten rakentamisen jälkeen ei kenttätutkimusten yhteydessä myöskään ole havaittu merkittävää EROD-aktiivisuuden lisääntymistä tehtaiden alapuolisissa vesistöissä (Petänen ym. 1993; Tana & Lehtinen 1995) verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin. Aikaisemmissa tutkimuksissa entsyymiaktiivisuuden lisääntyminen oli merkittävää ja sen katsottiin toimivan bioindikaattorina kalojen altistumisesta metsäteollisuuden jätevesille. Näiden tulosten valossa on syytä epäillä, että nykyiset sulfaattisellutehtaan valkaisu-jätevedet indusoisivat EROD:n aktiivisuutta.

Syytä tai yhdisteitä, jotka aiheuttavat nyt havaittua entsyymiaktiivisuuksien pienentymistä ei toistaiseksi voida osoittaa. Se, että entsyymiaktiivisuudet pienenevät myös altistettaessa kaloja suovedelle ja yhdyskuntajätevedelle viittaisi luontaisen ja myös yhdyskuntajätevedessä esiintyvien yhdisteiden mahdollisuuteen. Metsäteollisuuden jätevesien koostumuksen muututtua (Dahlman ym. 1995, Folke ym. 1993) puuperäisten yhdisteiden merkitys saattaa korostua. Viimeaikaisessa keskustelussa on esitetty hormonien kaltaisten yhdisteiden kuten esim. steroidien osuutta jätevesialueilla todettuihin vaikutuksiin ja erityisesti kalojen lisääntymiseen. Steroidien on todettu pienentävän kalojen MFO-aktiivisuuksia (Pajor ym. 1990) ja aiheuttavan lisääntymishäiriöitä kaloilla (Van Der Kraak 1992). Nyt tehtyjen kala-altistusten yhteydessä ylimääräiselle kontrolliryhmän kaloille annettiin 17- β -estradiolia (steroidi hormoni), jonka seurauksena tämän kalaryhmän EROD-aktiivisuudet olivat 90 % pienemmät kuin normaalin kontrolliryhmän kaloilla (Kuva 15).



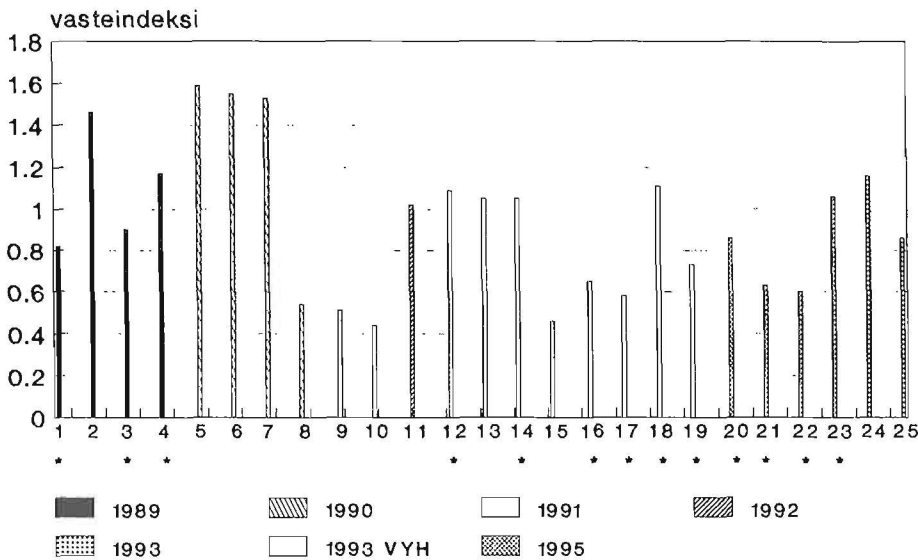
Kuva 15. EROD-vasteet ilmaistuna prosentuaalisena erona kontrollista mallieko-systeemiko-keiden yhteydessä tehdyissä kala-altistuksissa vuosina 1989 - 1995. Jätevedet on lueteltu kuvan 16 yhteydessä.

Lopuksi on syytä tarkastella kuinka nyt tutkittujen jätevesien kaloissa aiheuttamat vaikutukset suhtautuvat aikaisemmin vastaavanlaisissa kokeissa tutkittujen jätevesien aiheuttamiin vaikutuksiin. Tutkittuja jätevesiä ja niiden aiheuttamia vaikutuksia kaloihin on pyritty vertaamaan laskennallisen "vasteindeksin" avulla. Vasteindeksin laskemiseen on käytetty niitä samoja morfometrisia ja fysiologisia parametrisiä, joita on käytetty kaikissa malliekosysteemikokeissa. Eri tutkittujen jätevesien laskennalliset vasteindeksit on esitetty kuvassa 16. Tutkittuja jätevesiä verrataan antamalla jokaiselle muuttujalle arvo 0 ja 5 väliltä, jossa 0 = 0-10 % ero kontrollista ja 5 = yli 50 % ero kontrollista. Luvut lasketaan yhteen muuttujaryhmäkohtaisesti (morfometria, punasoluja kuvaavat muuttujat, valkosoluja kuvaavat muuttujat, maksan aineenvaihdunta, maksan entsyymi-toiminta) ja jaetaan ryhmäkohtaisten muuttujien määrällä. Tällä tavoin pyritään huomioimaan se, että eri tutkimuksissa on tutkittu eri määrä muuttujia ja vertailu saadaan yhteismitalliseksi. Kun ryhmäkohtaiset luvut on saatu, ne lasketaan yhteen ja luku jaetaan muuttujaryhmän määrällä, joka tässä tapauksessa on siis 5.

Vertailussa on mukana vain laimennoksessa 1:400 tehdyt altistukset, koska kaikkia jätevesiä ei ole tutkittu suuremmissa laimennuksissa. Vasteindeksissä on mukana sekä kontrollia suuremmat että pienemmät arvot ja vasteindeksiä laskettaessa eri muuttujat on biologisesti arvioitu samanlaisiksi.

Koivujakson valkaisu-jätevesien (numerot 16-19 kuvassa 16) osalta voidaan todeta, että TCF-valkaisu aiheuttaa suuremman vasteindeksin kuin ECF-valkaisu, mutta kummassakin tapauksessa jätevesien käsittely aktiivilietelaitoksessa pienentää laskennallista vasteindeksiä. Mäntyjakson osalta (numerot 20-23 kuvassa 16) tilanne ei ole yhtä selkeä. Esimerkiksi aktiivilietekäsittely ei ole pienentänyt TCF-valkaisusta peräisin olevan mäntyjakson jäteveden vasteindeksiä, vaan päinvastoin suurentanut sitä merkittävästi. Mäntyjakson ECF-valkaisusta peräisin olevan jäteveden vaikutukset ovat sen sijaan pienentyneet aktiivilietekäsittelyssä. Verrattaessa koivu- ja mäntyjakson valkaisu-jätevesiä keskenään, näyttäisi, että ECF-val-

Vasteindeksi laimennos 1:400



- | | | | |
|------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. O(C60D40)EoDED* | käsittlemätön | 2. O(C60D40)EoDED | ilm.lammikko |
| 3. O(C85D15)EoDED* | käsittlemätön | 4. OPD* | käsittlemätön |
| 5. (C20D80)(Eop)DED* | käsittlemätön | 6. (C20D80)(Eop)DED | aktiiviliete |
| 7. O(D27C68D5)EopDEpD | käsittlemätön | 8. O(D27C68D5)EopDEpD | ilm.lammikko |
| 9. (C84D16)EODED | aktiiviliete | 10. TMP+sanomalehti | ilm.lammikko+kem saos. |
| 11. O(C9D91)EoDED | aktiiviliete | 12. DEoDED* (HW) | käsittlemätön |
| 13. DEoDED (HW) | käsittlemätön | 14. QeZEopAzEPA* (HW) | käsittlemätön |
| 15. QeZEopAzEPA/DEoDED | aktiiviliete | 16. DEoDED* (HW) | käsittlemätön |
| 17. DEoDED* (HW) | pilot-aktiiviliete | 18. QeZEopAzEPA* (HW) | käsittlemätön |
| 19. QeZEopAzEPA* (HW) | pilot-aktiiviliete | 20. DEoDED* (SW) | käsittlemätön |
| 21. DEoDED* (SW) | pilot-aktiiviliete | 22. QeZEopAzEPA* (SW) | käsittlemätön |
| 23. QeZEopAzEPA* (SW) | pilot-aktiiviliete | 24. SUOVESI | käsittlemätön |
| 25. YHDYSKUNTAJÄTEVESI | aktiiviliete | | |

* = valkaisu-jätevesi; HW = lehtipuumassa(koivu); SW = havupuumassa(mänty)

Kuva 16. Vuosien 1989-1995 aikana malliekosysteemikokeiden yhteydessä tehtyjen kalafysiologisten tutkimusten perusteella saadut laskennalliset vasteindeksit eri tutkituille jätevesille.

kaisun osalta mäntyjakson jätevesien (No:t 16, 17 ja 20, 21) vaikutus olisi hieman suurempi kuin vastaavan koivujakson. TCF-valkaisu osalta koivujakson jätevedet näyttäisivät aiheuttavan suuremmat vaikutukset, mutta käsittelyn jälkeen ero koivujakson hyväksi on merkittävä. Suoveden (No. 24) ja käsitellyn yhdyskuntajäteveden (No. 25) kala-altistuksissa aiheuttamat vasteindeksit ovat kahta poikkeusta (No:t 18 ja 23) lukuunottamatta suuremmat kuin valkaisu-jätevesien aiheuttamat vasteindeksit.

Vuonna 1993 tehtiin tämän tutkimusprojektin lisäksi myös muita tutkimuksia ECF- ja TCF-jätevesien vaikutuksista. Näissä tutkimuksissa koivujakson käsittelmättömien ECF- ja TCF-valkaisu-jätevesien (12 ja 14 kuvassa 16) kalayksilöihin ai-

heuttamissa vaikutuksissa ei todettu eroja. Tehtaan koivujakson käsittelemätön kokonaisjätevesi (No. 13) antoi saman vaikutusindeksin kuin ECF- ja TCF-valkaisun jätevesi. Sen sijaan käsitelty havu- ja koivujaksojen ECF/TCF-valkaisujätevesiä sisältävä kokonaisjätevesi (No. 15) antoi selvästi pienemmän laskennallisen vasteindeksin. Vaikka vuoden 1993 tutkimuksissa käytetyt jätevedet olivat peräisin samasta tehtaasta oli ECF-valkaisu-jäteveden aiheuttamissa vasteindekseissä keskinäistä eroa. TCF-valkaisujäteveden osalla tätä eroa ei esiintynyt.

Laskennallisia vasteindeksejä vertailtaessa pienimmät indeksit on saatu altistettaessa kaloja käsitellyille sulfaattisellutehtaan kokonaisjätevesille (No:t 8 ja 9) sekä TMP-tehtaan kokonaisjätevedelle. Nykyisten ECF- ja TCF- valkaisujätevesien voidaan yleisesti katsoa laskennallisen vasteindeksitarkastelun perusteella aiheuttavan vähemmän vaikutuksia kuin 1980-luvun lopussa käytössä olleiden valkaisimoiden ja tehtaiden käsittelemättömät jätevedet. Tehtaiden käsiteltyt kokonaisjätevedet aiheuttavat tämän vertailun pienimmät vaikutukset. Vertailun perusteella voidaan myös sanoa, että nykyaikaisten sulfaattitehtaiden valkaisu- ja kokonaisjätevedet eivät aiheuta suurempia vaikutuksia kuin luonnontilaisesta suosta valuvat vedet tai käsitelty yhdyskuntajätevesi.

Johtopäätökset

Tutkimuksen tulokset vahvistavat edelleen sitä käsitystä, että nykyiset valkaisu-jätevedet ja varsinkaan käsitelty valkaisu-jätevedet eivät sisällä sellaisia määriä kloorifenolisia yhdisteitä tai hartsihappoja, että ne aiheuttaisivat merkittäviä vaikutuksia kalayksilöissä. Kalojen sapesta mitatut ko. yhdisteiden pitoisuudet ovat taustatarvojen tasolla eikä pitoisuuksien ja kaloissa todettujen fysiologisten vasteiden välillä todettu riippuvuutta. Myöskään jäteveden klooratun orgaanisen aineksen (AOX) ja vasteiden välillä ei todettu riippuvuutta. Tämän perusteella kloorattujen yhdisteiden merkitystä vaikutusten aiheuttajana ei voida pitää ratkaisevana. Prosessimuutosten jälkeen jätevesien koostumus on muuttunut ja esim. muiden puuperäisten luontaisten yhdisteiden vaikutus saattaa korostua.

Kaloihin kohdistuvat vaikutukset näkyivät selvimmin energia-aineenvaihdunnassa ja maksan toiminnassa, ja ECF- ja TCF-valkaisu-jätevesien aiheuttamat vasteet olivat samansuuntaisia ja voimakkuudeltaan yhtä suuria. Kala-altistusten perusteella ECF- ja TCF-valkaisun jätevedet eivät toksisuudeltaan ja ympäristövaikutuksiltaan poikkea merkittävästi toisistaan. Johtopäätös tukee aiempien tutkimusten johtopäätöksiä.

Mänty- ja koivujakson jätevesien aiheuttamat vaikutukset ovat samanlaisia, mutta mäntyjakson jätevedet vaikutuksiltaan hieman suurempia.

Maksan EROD-entsyymin aktiivisuudessa havaitut muutokset viittaisivat myös siihen, että luonnollisten puuperäisten ja hormonien tapaisten yhdisteiden merkitys korostuu. Tämän projektin I ja II vaiheen kala-altistuksissa on havaittu pääasiassa entsyymiaktiivisuuden pienentymistä, joka on päinvastaista kuin monesti aikaisemmin jätevesialtistusten yhteydessä on todettu.

Suo- ja yhdyskuntajäteveden todettiin aiheuttavan samanlaisia ja vähintään yhtä suuria vasteita kuin valkaisu-jätevesien. Laskennallisten vasteindeksien perusteella nykyaikaisista sulfaattisellutehtaista peräisin olevat valkaisu- ja käsitelty kokonaisjätevedet eivät aiheuta kalayksilöissä suurempia vaikutuksia kuin luonnon-tilaisesta suosta valuvat vedet tai käsitelty yhdyskuntajätevesi. Tämä on merkittävä seikka kenttätutkimusten tuloksia tarkasteltaessa.

Tutkimuksissa on käytetty kirjolohia. Altistetuista kaloista tutkittujen muuttujen arvot ovat olleet yleensä puhtaassa vedessä altistetuista kaloista mitatun luonnollisen vaihtelun puitteissa. Tämän perusteella altistetuista kaloista todetut muutokset eivät aiheuta vakavaa vaikutusta yksilötasolla. Sen sijaan yksilötasolla energiankäytössä todettujen muutosten suhde populaatiotason vaikutuksiin kuten esim. lisääntymiseen on mahdollinen mutta edelleen tuntematon.

Kirjallisuus

- Dahlman, O., Reimann, A., Strömberg, L., and Mörck, R., 1995. On the effects of high molecular weight effluent materials from modern ECF- and TCF-bleaching. - *Tappi Journal* 78(12): 99-109.
- Folke, J., Landner, L., Lehtinen, K.-J., Männistö, E., Männistö, H., and McCubbin, N. 1993. Chlorine dioxide in pulp bleaching - technical aspects and environmental effects. Literature study. - CEFIC, Chlorate Sector Group, Brussels, Belgium, pp. 236.
- Grahn, O., & Grotell, C., 1995. Effects in model ecosystems of bleach plant and whole mill effluents from production of ECF- and TCF-bleached softwood kraft pulp at the Södra Cell Ab mill Värö Bruk. - MFG-report, 1995-09-14, Fryksta, Sweden.
- Hodson, P.V., McWhirter, M., Ralph, K., Gray, B., Thivierge, D., Carey, J.H., Van Der Kraak, G., Whittle, D.M., & Levesque, M.-C., 1992. Effects of bleached kraft mill effluent on fish in the St.Maurice river, Quebec. - *Environ. Toxicol Chem.* 11: 1635-1651.
- Jimenez, B.J., Oikari, A., Adams, S.M., Hinton, D.E., & McCarthy, J.F., 1990. Hepatic enzymes as biomarkers: Interpreting the effects of environmental, physiological and toxicological variables. - In McCarthy, J.F. & Shugart, L.R. (eds). *Biomarkers of environmental contamination*. Lewis Publ. 1990, New York, London.
- Landner, L., Grhn, O., Härdig, J., Lehtinen, K.-J., Monfelt, C., & Tana, J., 1994. A field study of environmental impacts at a bleached kraft pulp mill site on the Baltic Sea coast. - *Ecotoxicol. Environ. Safety* 27: 128-157.
- Larsson, Å., Haux, C., & Sjöbeck, M.-L., 1986. Toxiska effekter av metaller på fisk. Prövning av fysiologisk testmetodik. - Statens Naturvårdsverket, Rapport 3166, Solna, Sverige.
- Lehtinen, K.-J. 1996. Biochemical responses in organisms exposed to effluents from pulp production - Are they related to bleaching? - In. Servos, M.R, Munkittrick, K.R., Carey, J.H, van der Kraak, G.J. (eds). *Environmental fate and effects of pulp and paper mill effluents*. St Lucie Press, Delray Beach, Florida.
- Lehtinen, K.-J., & Tana, J., 1996. Assessing the aquatic environmental impact of ECF and TCF pulping operations using multispecies mesocosms and fish biomarker tests. - In. Turoski, V. (ed). *Chlorine in Chlorine Compounds in the Paper Industry*. Ann. Arbor. Press. (in press)
- Lehtinen, K.-J., Tana, J., Karlsson, P., Engström, C., Mattsson, K., Hemming, S., Hemming, J., & Fugleberg, A.-L., 1992. Chemical characterization and effects in Baltic Sea littoral mesocosms of treated and untreated effluents from bleached hardwood kraft pulp production. - *Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A 105*, ISBN 951-47-6321-1.
- Lehtinen, K.-J., Tana, J., Mattsson, K., Härdig, J., Karlsson, P., Grotell, C., Hemming, S., Engström, C., & Hemming, J., 1993. Ecological impact of pulp mill effluents, Parts I and II. - *Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja -sarja A 133*, ISBN 951-47-7137-0.
- Lindström-Seppä, P., 1990. Biotransformation in fish: Monitoring inland water pollution caused by pulp and paper mill effluents. - PhD thesis, Publ. Univ. Kuopio 8/1990, Kuopio, Finland.
- Mattsson, K., Lehtinen, K.-J., Stolpe, C., Marnila, P., Koivula, J. Härdig, J., Tana, J., Bister, H., & Bylund, G., 1996. Leverfunktion hos regnbågslox, *Oncorhynchus mykiss*, vid exponering för substanser i skogsindustriella avloppsvatten. - Rapport för Finlands Akademi, 1996-03-15, Nagu, Finland.
- McLeay, D.J., & Gordon, M.R., 1977. Leucocrit: A simple hematological technique for measuring acute stress in salmonid fish, including stressful concentrations of pulpmill effluent. - *J. Fish. Res. Bd. Can.* 34(11): 2164-2175.
- Mikkelsen, P., & Paasivirta, J., 1996. TCF- ja ECF-mäntymassojen kokonaisjätevesien kemiallinen karakterisointi. - Raportti 1996-05-24, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Jyväskylä, Finland.
- Monfelt, C., & Härdig, J., 1994. Naturlig variationsbredd i fysiologiska mätvärden hos abborre och regnbåge. (in press).
- Oikari, A., & Nakari, T., 1982. Kraft pulp mill effluent components cause liver dysfunction in trout. - *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 28: 266-270.

- Oikari, A., & Holmbom, B., 1986. Assessment of water contamination by chlorophenolics and resin acids with the aid of fish bile metabolites. - *Aq. Toxicol. Env. Fate*: 9th vol. ASTM STP 921, Poston, T.M., & Purdy, R. (eds), Am. Soc. Test. Mat. Philadelphia 1986, pp 252-267.
- Oikari, A., & Kunnamo-Ojala, T., 1987. Tracing of xenobiotic contamination in water with the aid of fish bile metabolites: A field study with caged rainbow trout (*Salmo gairdneri*). - *Aquat. Toxicol.* 9: 327-341.
- Owens, J.W., 1991. The hazard assessment of pulp and paper effluents in the aquatic environment: A review. - *Environ. Toxicol. Chem.* 10: 1511-1540.
- Pajor, A.M., Stegeman, J.J., Thomas, P., & Woodin, B.R., 1990. Feminization of the hepatic microsomal cytochrome P-450 system in brook trout by estradiol, testosterone, and pituitary factors. - *J. Experim. Zool.* 253:51-60.
- Petänen, T., Soimasuo, R., & Oikari, A., 1993. Sellu- ja paperitehtaan prosessi-muutosten vaikutukset kalan biomarkereihin Etelä-Saimaalla. - Joensuun Yliopiston Julkaisuja no 103, Joensuun Yliopisto, Joensuu, Finland.
- Sangfors, O., Tana, J., Härdig, J., & Grotell, C., 1994. Environmental effects of ECF- and TCF-bleached pulp mill effluents. Part III: Model ecosystem studies with pilot scale treated bleachery effluents from production of ECF and TCF pulp. - In: Verta, M., (ed). Hapikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksista. - Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A 189. ISBN 951-47-9700-0.
- Södergren, A., 1988. Biologiska effekter av blekeriavlopp. Slutrapport från projektområdet MILJÖ/CELLULOSA 1. - Statens naturvårdsverket, Rapport 3498.
- Tana, J., 1988. Sublethal effects of chlorinated phenols and resin acids on rainbow trout (*Salmo gairdneri*). - *Wat. Sci. Technol.* 20(2): 77-85.
- Tana, J., Lehtinen, K-J., 1989. Uimaharjun tehtaiden jätevesien vaikutuksista kalojen makuun sekä orgaanisiin klooriyhdiste- ja hartsihappo- pitoisuuksiin vedessä, sedimentissä ja kaloissa. - MFG-raportti, 1989-12-13, Espoo, Finland.
- Tana, J., Lehtinen, K-J., 1995. Enocell Oy:n sellutehtaan jätevesien vaikutuksista alapuolisessa vesistössä sumputettuihin kaloihin. - MFG-raportti, 1995-01-31, Espoo Finland.
- Tana, J., Lehtinen, K-J., 1996. The aquatic environmental impact of pulping and bleaching operations - an overview. - *The Finnish Environment* 17.
- Tana, J., Rosemarin, A., Lehtinen, K-J., Härdig, J., Grahm, O., & Landner, L. 1994. Assessing impacts on Baltic coastal ecosystem with mesocosms and fish biomarker tests. A comparison of new and old wood pulp bleaching technologies. - *Sci. tot. Environ.* 145: 213-234.
- Van Der Kraak, G.J., Munkittrick, K.R., McMaster, M.E., Portt, C.B., & Chang, J.P., 1992. Exposure to bleached kraft mill effluent disrupts the pituitary-gonadal axis of white sucker at multiple sites. - *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 115: 224-233.
- Verta, M. (toim.), 1994. Hapikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia. - Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A 189, ISBN 951-47-9700-0.

Kuvailulehti

| | | |
|---|--|--|
| Julkaisija | Suomen ympäristökeskus | Julkaisu-aika Huhtikuu 1998 |
| Tekijä(t) | Karl-Johan Lehtinen, Jukka Tana, Kaj Mattsson, Christina Engström, Tarja Nakari, Jukka Ahtiainen, Marit Lagus | |
| Julkaisun nimi | Happikemikaalien käyttöön perustuvan massavalkaisun ympäristövaikutuksia Vaihe II. Malliekosysteemikokeet | |
| Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut Tiivistelmä | <p>Projektin vaiheesta I ovat ilmestyneet seuraavat julkaisut: Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisusarja A nro 189, Suomen ympäristökeskuksen monistheet nrot 3, 4 ja 20 sekä The Finnish Environment -sarjan julkaisu nro 17. Vaiheesta II tulee ilmestymään 4 julkaisua.</p> <p>Projektin I vaiheen tulosten sekä sen jälkeen tehdyn kirjallisuustutkimuksen perusteella pidettiin tarpeellisena jatkaa projektia vaiheella II. Se sisälsi ECF- ja TCF-mäntymassan pilot-puhdistettujen jätevesien malliekosysteemitutkimuksia, kemiallista karakterisointia sekä akuutteja screenaustestejä.</p> <p>Vertailukohteina tutkittiin myös yhdyskuntajätevettä ja suovettä. Suovesi ja yhdyskuntajätevesi aiheuttivat murtovesiympäristöä kuvaavissa malliekosysteemeissä enemmän muutoksia kuin tutkitut valkaisu-jätevedet. Vaikutusmekanismeissa eroa: Suoveden ja yhdyskuntajäteveden vaikutus rehevöittävä ja valkaisu-jätevesien vaikutusmekanismi enemmänkin kemiallinen. TCF-jäteveden aiheuttaessa enemmän muutoksia malliekosysteemin toiminnassa Kalayksilöissä ECF- ja TCF-valkaisu-jätevesien aiheuttamat vasteet olivat samanlaisia ja suoveden sekä yhdyskuntajäteveden todettiin aiheuttavan vähintään yhtä suuria vasteita kuin valkaisu-jätevesien.</p> | |
| Asiasanat | Valkaisu, jätevesi, malliekosysteemi, ympäristövaikutukset, kala, ECF, TCF | |
| Julkaisusarjan nimi ja numero | Suomen ympäristö 195 | |
| Julkaisun teema | ympäristönsuojelu | |
| Projekti-hankkeen nimi ja projektin numero | Happikemikaalien käyttöön perustuvan massavalkaisun ympäristövaikutuksia, Vaihe II, nro xc 101 | |
| Rahoittaja/ toimeksiantaja | Enso Oy, Finnish Peroxides Oy, Kemira Chemicals Oy, Oy Metsä-Botnia Ab, UPM-Kymmene Oy, Suomen ympäristökeskus, Ympäristöministeriö | |
| Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot | Enso Oy, Finnish Peroxides Oy, Kemira Chemicals Oy, Oy Metsä-Botnia Ab, UPM-Kymmene Oy, Suomen ympäristökeskus, Suomen ympäristötutkijaryhmä, Jyväskylän yliopisto, Keskuslaboratorio, LoSYK, LSYK | |
| | ISSN 1238-7312 | ISBN 952-11-0262-4 |
| | Sivuja 98 | Kieli suomi |
| | Luottamuksellisuus Julkinen | Hinta 74 mk |
| Julkaisun myynti/ jakaja | Suomen ympäristökeskuksen asiakaspalvelu, sähköpostiosoite: neuvonta.syke@vyh.fi faksi 09-4030 0190, puh. 09-4030 0100 | Oy Edita Ab asiakaspalvelu, puh. 09-566 0266 faksi 09-566 0380 |
| Julkaisun kustantaja | Suomen ympäristökeskus | |
| Painopaikka ja -aika | Oy Edita Ab, Helsinki 1998 | |

Presentationblad

| | | |
|--|---|--|
| Utgivare | Finlands miljöcentral | Datum April 1998 |
| Författare | Karl-Johan Lehtinen, Jukka Tana, Kaj Mattsson, Christina Engström, Tarja Nakari, Jukka Ahtiainen, Marit Lagus | |
| Publikationens titel | Happikemikaalien käyttöön perustuvan massavalkaisun ympäristövaikutuksia Vaihe II. Malliekosysteemikokeet (Miljösekvenser vid blekning av massa med syrgaskemikalier Del II. Modellekosystemförsök) | |
| Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt | Tidigare har följande publikationer från Del I utkommit: Vatten- och miljöstyrelsens publicationer – serie A 189, Miljön i Finland 17, Finska Miljöcentralens rapporter nr 3, nr 4 och nr 20. Från Del II utges fyra publicationer | |
| Sammandrag | <p>På basen av resultaten från Del I samt utförda litteraturoversikten ansågs det motiverat att fortsätta projektet med Del II. Del II har omfattat modellekosystemförsök med pilot-behandlade blekeriavloppsvatten från production av ECF och TCF barrvedsulfatmassa, kemisk karakterisering samt toxicitetstester.</p> <p>Som jämförelse undersöktes även effekterna av myrvatten och behandlat kommunalt avloppsvatten. Myrvatten och kommunalt avloppsvatten förorsakade mera förändringar i brackvatten modellekosystemen än de testade blekeriavloppsvattnen. Myrvatten och kommunalt avloppsvatten hade en huvudsakligen eutrofierand effekt medan effekten hos blekeriavloppsvattnen var mera av kemisk karaktär och TCF-vattnen förorsakade mera förändringar i modellekosystemets funktion än de testade ECF-vattnen. Responsen hos fisk exponerade för ECF- och TCF-avloppsvatten var likartade eller mindre än respons observerade hos fisk exponerade för myrvatten och kommunalt avloppsvatten.</p> | |
| Nyckelord | Blekeri, avloppsvatten, modellekosystem, miljöeffekter, fisk, ECF, TCF | |
| Publikationsserie och nummer | Suomen ympäristö 195 (Miljön i Finland 195) | |
| Publikationens tema | miljövård | |
| Projektets namn och nummer | Miljöeffekter vid blekning av massa med syrekemikalier | |
| Finansiär/ uppdragsgivare | Enso Oy, Finnish Peroxides Oy, Kemira Chemicals Oy, Oy Metsä-Botnia Ab, UPM-Kymmene Oy, Finlands miljöcentral, Miljöministeriet | |
| Organisationer i projektgruppen | Enso Oy, Finnish Peroxides Oy, Kemira Chemicals Oy, Oy Metsä-Botnia Ab, UPM-Kymmene Oy, Finlands miljöcentral, Finska miljöforskargruppen, Jyväskylä universitet, Centrallaboratorium. | |
| | ISSN 1238-7312 | ISBN 952-11-0262-4 |
| | Sidantal 98 | Språk finska |
| | Offentlighet Offentlig | Pris 74 mk |
| Beställningar/ distribution | Finlands miljöcentral, kundservice e-mail: neuvonta.syke@vyh.fi telefax 09-4030 0190, tel. 09-4030 0100 | Oy Edita Ab tel. 09-566 0266 telefax 09-566 0380 |
| Förläggare | Finlands miljöcentral | |
| Tryckeri/ tryckningsort och -år | Oy Edita Ab, Helsingfors 1998 | |

Documentation page

| | | |
|--|---|---|
| Publisher | Finnish Environment Institute | Date April 1998 |
| Author(s) | Karl-Johan Lehtinen, Jukka Tana, Kaj Mattsson, Christina Engström, Tarja Nakari, Jukka Ahtiainen, Marit Lagus | |
| Title of publication | Happikemikaalien käyttöön perustuvan massavalkaisun ympäristövaikutuksia Vaihe II. Malliekosysteemikokeet (Environmental effects of ECF- and TCF-bleached pulp mill effluents. Part II. Mesocosm studies.) | |
| Parts of publication/ other project publications | Following publications have been published from part I: Publications of the Water and other project Environment Administration – series A 189, The Finnish Environment 17, Suomen ympäristökeskuksen monistheet no 3, 4 and 20. Part II of this project will include 4 publications. | |
| Abstract | <p>According to results from Part I and the literature review it was considered necessary to continue the project. Part II included effect studies in mesocosms exposed to pilot treated bleach plant effluents from production of softwood ECF and TCF kraft pulp production, chemical characterization and toxicity tests.</p> <p>In addition to bleach plant effluents, municipal sewage and natural peat bog water were also tested. Peat bog water and municipal sewage water caused more pronounced deviations in brackish water littoral mesocosms as compared to bleach plant effluents. The effects caused by peat bog water and municipal water were more of a eutrophying character whereas the effect of exposure to ECF and TCF bleach plant effluents was not attributable to eutrophication but to chemical pollution with TCF-effluents showing inhibitory effects on the functional level. Responses in fish exposed to ECF- and TCF-bleach plant effluents were of the same kind and the magnitude was similar, or lower, than responses caused by peat bog water and municipal sewage water.</p> | |
| Keywords | Effects, bleach plant effluents, mesocosms, fish, ECF, TCF | |
| Publication series and number | Suomen ympäristö 195 (The Finnish Environment 195) | |
| Theme of publication | Environmental protection | |
| Project name and number, if any | Environmental effects of ECF- and TCF-bleached pulp | |
| Financier/ commissioner | Enso Oy, Finnish Peroxides Oy, Kemira Chemicals Oy, Oy Metsä-Botnia Ab, UPM-Kymmene Oy, Suomen ympäristökeskus, Finnish Environment Institute, Ministry of Environment | |
| Project organization | Enso Oy, Finnish Peroxides Oy, Kemira Chemicals Oy, Oy Metsä-Botnia Ab, UPM-Kymmene Oy, Suomen ympäristökeskus, Finnish Environment Institute, Finnish Environmental Research Group, University of Jyväskylä, The Finnish pulp and paper Research Institute. | |
| | ISSN 1238-7312 No. of page 98 Restrictions For public use | ISBN 952-11-0262-4 Language Finnish Price 74 FIM |
| For sale at/ distributor | Finnish Environment Institute e-mail: neuvonta.syke@vyh.fi telefax + 358-9-4030 0190, tel. + 358-9-4030 0100 | Edita Ltd tel. + 358-9-566 022 telefax + 358-9-566 0380 |
| Financier of publication | Finnish Environment Institute | |
| Printing place and year | Edita Ltd, Helsinki 1998 | |

Suomen ympäristö

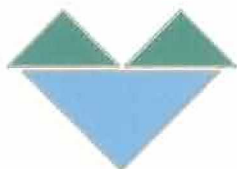
1. Järvinen, Mika: Ympäristöystävä vai vapaamatkustaja? Suomen ympäristökeskus.
2. Saukkonen, Sari & Kenttämies, Kaarle (toim.): Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristökeskus.
3. Kosola, Marjaleena; Miettinen, Pauli & Laikari, Hannu: Ympäristötalous - ajankohtaisia tutkimus- ja kehittämistehtäviä. Suomen ympäristökeskus.
4. Riihimäki, Juha; Yrjänä, Timo & van der Meer, Olli: Lyhytaikaisäädön elinympäristövaikutusten arviointimenetelmät. Suomen ympäristökeskus.
5. Blomster, Jaannika: Ravinnekruornituksen vaikutus rantavyöhykkeen leväyhteisöihin ja vaikutusten arvioinnissa käytetyt menetelmät. Suomen ympäristökeskus.
6. Soveri, Jouko & Peltonen Kimmo: Lumen ainepitoisuudet ja talviaikainen laskeuma Suomessa vuosina 1976–1993. Suomen ympäristökeskus.
7. Britschgi, Ritva: Pohjavesien suojelun ja kiviaineshuollon yhteensovittaminen – esiselvitys Vaasan seudulla. Suomen ympäristökeskus.
8. Hutka, Reijo; Laitinen, Timo; Holmberg, Maria; Maunula, Markku & Schultz, Titta: Happamien sulfaattimaiden ionivirtausmalli (HAPSU). Suomen ympäristökeskus.
9. Hagan, Harri: Lähiökorjaamisen arkkitehtoniset vaikutukset. Ympäristöministeriö.
10. Kylä-Setälä, Annamajja & Assmuth, Timo: Suomen maaperän tila, kuormitus ja suojelu. Suomen ympäristökeskus.
11. Hyvärinen, Pekka; Vehanen, Teppo; Tigunov, Sergei; Mäki-Petäys, Aki & Konttinen, Erja: Kalojen vaellus Inarijärvestä Paatsjokeen. Suomen ympäristökeskus.
12. Palveluasumistyöryhmä: Palveluasumistyöryhmän muistio. Ympäristöministeriö.
13. Lepistö, Liisa & Pietiläinen, Olli-Pekka: Kasviplanktonin määrän ja koostumuksen muutokset Lokassa, Porttipahdassa ja Kemijärvessä. Suomen ympäristökeskus.
14. Kaukonieni, Tapani & Tikkanen, Hannu: Kulttuurimaaiseman kasvot, Nivalan Kotila. Ympäristöministeriö.
15. Korhonen, Pekka & Virtanen, Markku: Elohopean kertymisen kuvaaminen matemaattisella mallilla – Arvio Kokemäenjoen keskiosan ruoppauksen vaikutuksesta vesistön elohopeatilanteeseen. Suomen ympäristökeskus.
16. Virkkala, Raimo: Metsien suojelualueverkon rakenne ja kehittämistarpeet – ekologinen lähestymistapa. Suomen ympäristökeskus.
17. Tana, Jukka & Lehtinen, Karl-Johan: The aquatic environmental impact of pulping and bleaching operations – an overview. Suomen ympäristökeskus.
18. Nippala, Eero & Jaakkonen, Liisa: Asuinkerrostalojen kuntoarviot. Ympäristöministeriö.
19. Karjalainen, Heli; Seppälä, Satu & Walls, Mari: Ammoniumtyypen merkitys kasviplanktonituotantoa säätelevänä tekijänä – esimerkkinä Kallavesi. Pohjois-Savon ympäristökeskus.
20. Lepistö, Liisa; Cronberg, Gertrud & Tikkanen, Toini: Records of some algal species, Nordic Phytoplankton Workshop 7–10.6.1994. Suomen ympäristökeskus.
21. Pesonen, Reijo: Vuorovaikutteista suunnittelua Jyväskylän Kerkkolassa. Ympäristöministeriö.
22. Rouhiainen, Hanna: Rakentamisen ja kiinteistönmuodostuksen ohjaaminen haja-asutusalueilla Vertaileva selvitys haja-asutuksesta Suomessa, Ruotsissa, Norjassa, Tanskassa, Saksassa ja Englannissa. Ympäristöministeriö.
23. Heikkilä, Mikko; Karppinen, Seppo & Santasalo, Tuomas: Suomalaisia kävelykeskustoja. Ympäristöministeriö.
24. Kiviranta, Samuel, Summala, Mika & Hänninen Pekka: Työpaikka-alueiden käytön tehostaminen. Yhteenvetoraportti. Ympäristöministeriö.
25. Marttinen, Kari: Hallintosopimukset ympäristöpolitiikan ohjauksena. Ympäristöministeriö.
26. Hammar, Taina; Huovila, Juhani; Lahti, Erkki; Manninen, Pertti; Oksman, Heikki; Punju, Pirjo & Taipainen, Irmeli: Pyödyksiä limoittavan *Hydrotheca dissiliens* -koristelevän runsastumisesta ja sen syistä. Pohjois-Savon ympäristökeskus.
27. 5th Annual Report 1996, UN ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems. Suomen ympäristökeskus.
28. Sojakka, Pekka: Perifitynmenetelmien käyttökelpoisuus kalankasvatuksen vesistövaikutusten arvioinnissa. Etelä-Savon ympäristökeskus.
29. Kuusamotyöryhmä: Kuusamon yhteismetsän vanhojen metsien luonnonarvojen säilyttäminen ja yhteismetsän toiminnan turvaaminen. Ympäristöministeriö.
30. Vanhojen metsien suojelutyöryhmä: Vanhojen metsien suojelu Pohjois-Suomessa – Vanhojen metsien suojelutyöryhmän osamietintö III. Ympäristöministeriö.
31. Pirinen, Auli; Salminen, Markku; Speeti, Tero: Asuinkerrostalon huoltokirja esimerkkikohteeseen. Ympäristöministeriö.
32. Pirinen, Auli; Salminen, Markku; Speeti, Tero: Asuintalon huoltokirjan laadinta. Ympäristöministeriö.
33. Mukherjee, Arun B: The use and release of silver in Finland. Suomen ympäristökeskus.
34. Laine, Anne; Sutela, Tapio; Heikkinen, Kaisa; Karvonen, Keijo; Huhta, Arto; Muotka, Timo & Lapalainen, Antti: Turvetuotannon vaikutukset koskikaloihin ja niiden elinympäristöön. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus.
35. Savolainen, Mirja; Kaasinen, Aulis; Heikkinen, Kaisa; Ihme, Raimo; Kämä, Tarmo & Alasaarela, Erkki: Turvetuotannon vesien suojeluvaihtoehtojen tapauskohtainen vertailu. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus.

36. Alanen, Jouni & Saastamoinen, Salla: Euroopan Unioniin tuotavat rakennustuotteet, vaatimusten mukaisuuden osoittaminen. Ympäristöministeriö.
37. Pohjois-Suomen vanhojen metsien suojelun kompensatiotyöryhmän mietintö. Ympäristöministeriö.
38. Tanskanen, Juha-Heikki: Syntypaikkalajitteluun perustuvan yhdyskuntajätehuollon tarkastelu. -jätevirrat, kustannukset ja päätökset. Suomen ympäristökeskus.
39. Malaska, Pentti; Luukkanen, Jyrki; Vehmas, Jarmo & Kaivo-oja, Jari: Ympäristöperusteinen energiaaveroitus Pohjoismaisia vertailuja ja suomalaisen keskustelun arviointia. Ympäristöministeriö.
40. Ilén, Pekka; Rautavuori, Leena & Salminen, Eero: Uukuniemen kirkonkylän kulttuurimaiseman hoitosuunnitelma. Ympäristöministeriö.
41. Ympäristöministeriö: Kaavoitustoimen seuranta. Ympäristöministeriö.
42. Outila, Tarja: Keivitsan kaivoshanke – kaavoitusjärjestelmät ja luonnonsuojelu. Ympäristöministeriö.
43. Lankinen, Markku: Asuntorakentamisen ennakointi – Määrästä laatuun. Ympäristöministeriö.
44. Tanskanen, Heikki; Walls, Mari; Maripuu, Lea & Tuhkanen, Tuula: Otsonoinnin ja otsoni/vetyperoksidikäsittelyjen vaikutus metsäteollisuuden kuorimovesien ekotoksisuuteen. Pohjois-Savon ympäristökeskus.
45. Huttunen, Leena; Rönkä, Esa & Matinvesi, Jukka: Erilaisten viljely- ja lannoitustapojen vaikutus pohjaveden laatuun – lysimetritutkimus karkealla hietamaalla. Suomen ympäristökeskus.
46. Paulus, Ilkka: Romaniväestön asuntotilanne 1990-luvun puolivälissä. Ympäristöministeriö.
47. Monitoimijainen lähiuudistus. Lähiötyöryhmän loppuraportti ja toimenpide-ehdotukset. Ympäristöministeriö.
48. Tarkoma, Jari: Asumisoikeusasunnot- ja asukkaat. Tilastaselvitys vuosina 1992 ja 1993 valmistuneista asunnoista. Ympäristöministeriö.
49. Saarenheimo, Ulla & von Hertzen, Heikki, S: Asunottomuus väheni Suomessa. Määrätietoinen työ tuo tuloksia. Ympäristöministeriö.
50. Myllymäki, Pauliina: Radonin ja uraanin poisto kalliopohjavedestä. Suomen ympäristökeskus.
51. Salo, Simo; Ekholm, Petri & Knuuttila, Seppo : A comparison of methods for nutrient source apportionment in Nordic rivers. Suomen ympäristökeskus.
52. Paukkunen, Marika & Vartia, Pauli: Selvitys ympäristövaikutusten arviointimenettelyn kokemuksista 1994–95. Ympäristöministeriö.
53. Haimi, Jari & Salminen, Janne: Kemikaalien haittavaikutukset terrestrisessä ympäristössä – tutkimus- ja testimenetelmien kehittäminen erityisesti suomalaiselle maaperälle. Suomen ympäristökeskus.
54. Rintala, Jari: Soranottoalueiden jälkihoito – pintarakennemateriaalit suojaverhouksessa. Suomen ympäristökeskus.
55. Britschgi, Ritva & Gustafsson, Juhani (toim.): Suomen luokitellut pohjavesialueet. Suomen ympäristökeskus.
56. Heli Vuoksima: Lasipakkausten kierrätysjärjestelmät ja niiden kustannukset Suomessa - keräysjärjestelmien kustannustehokkuusvertailu. Ympäristöministeriö.
57. Nysten, Taina & Hänninen, Tuija: Tiesuolan pohjavesihaittojen vaikutuksista ja torjuntakeinoista. Suomen ympäristökeskus.
58. Marttunen, Mika; Hellsten, Seppo; Puro, Annukka; Huttula, Erkki; Nenonen, Marja-Leena, Järvinen, Erkki; Salonen, Erno; Palomäki, Risto; Huru, Helge & Bergman, Tarja: Inarijärven tila, käyttö ja niihin vaikuttavat tekijät. Lapin ympäristökeskus.
59. Kettunen, Aija: Kuntien ympäristöhallinnon asema ja tila; Faktaa ja käsityksiä. Ympäristöministeriö.
60. Uusien vuokrasuhteiden vuokrat. Tilastaselvitys vapaarahoitteisten vuokra-asuntojen uusista vuokrasuhteista huhtikuussa 1996. Ympäristöministeriö.
61. Pehkonen, Pertti & Jansson, Jonna: Viheralan tutkimus- ja kehittämistyö. Tilannekatsaus. Ympäristöministeriö.
62. Söderman, Lundsten, Leinonen & Grönholm: Valtakunnallisen yöperhosseurannan 3. vuosiraportti. 3 Nocturna Annual Newsletter 1995. Suomen ympäristökeskus.
63. Rosenström, Ulla; Lehtonen, Markku & Muurman, Jarmo: Trends in the Finnish Environment - Indicators for the 1997 OECD Environmental Performance Review of Finland. Ympäristöministeriö.
64. Haarni, Tuukka & Vartiainen, Perttu: Kaupunkiverkostoituminen Suomessa. Ympäristöministeriö.
65. Nyman, Halmetoja; Pohutamaa ym: M/S Eiran öljyvahingon pitkäaikaiset vaikutukset Merenkurkussa. Länsi-Suomen ympäristökeskus.
66. Sinisalmi, Tuomo (toim.): Vesivoimalaitosten lyhytaikaisäädön vaikutustutkimukset. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus.
67. Kananoja, Tapio: Kymen läänin kallioperän suojelu- ja opetuskohteita. Ympäristöministeriö.
68. Keppo, Eeva: Vaasan läänin kulttuuriympäristöohjelma.
69. Hyvärinen, Veli (toim.): Hydrologinen vuosikirja 1993. Hydrological yearbook 1993. Suomen ympäristökeskus.
70. Savolainen, Matti: Omakotitalojen kustannuslaskentajärjestelmä. Ympäristöministeriö.
71. Nysten, Taina; Suokko, Tuulikki & Tarvainen, Timo: Ympäristögeologian sovelluksia GTK – SYKE ympäristötutkimusseminaari 1.10.1996. Suomen ympäristökeskus.
72. Kemppainen, Eija: Suomen uhanalaiset lajit. Ketonukki (*Androsace septentrionalis*). Suomen ympäristökeskus.
73. Halonen, Pekka; Tuukki, Eeva; Puolasmaa, Arto & Kaipiainen, Heidi: Suomen uhanalaisia lajeja: Pohjanhyttelöjäkälä (*Collema curtisporum*) Lännehyytelöjäkälä (*Collema nigrescens*) Risahyytelöjäkälä (*Collema multipartitum*). Suomen ympäristökeskus.
74. Kemppainen, Eija & Karling, Marita: Suomen uhanalaisia lajeja: Koirankieli (*Cynoglossum officinale*). Suomen ympäristökeskus.
75. Kosonen, Lasse; Kaipiainen, Heidi & Kemppainen, Eija: Suomen uhanalaiset lajit Mäkiorvokki (*Viola collina*). Suomen ympäristökeskus.

76. Pykälä, Juha & Vuorinen Soili: Suomen uhanalaiset lajit. Punavalkku (*Cephalanthera rubra*). Suomen ympäristökeskus.
77. Pykälä, Juha & Vuorinen Soili: Suomen uhanalaisia lajeja: Vuorikuisma (*Hypericum montanum*). Suomen ympäristökeskus.
78. Kaipainen, Heidi; Kemppainen, Eija & Bonn; Thomas: Suomen uhanalaisia lajeja: Tähhälmikkä (*Melica ciliata*). Hotade arter i Finland: Grusslok (*Melica ciliata*). Suomen ympäristökeskus.
79. Joensuu, Ilona; Vuori, Kari-Matti & Nieminen, Mari: Vesistöarakentamisen ja lyhytaikaisäännöstelyn vaikutus Perhonjoen koskien eliöyhteisöihin. Keski-Pohjanmaan ympäristökeskus.
80. Hassi, Laura: Ihanteita ja ohjausvälineitä - asumisen tuen kohdentuminen vuonna 1993. Ympäristöministeriö.
81. Grönroos, Juha; Rekolainen, Seppo & Nikander, Antero: Maatalouden ympäristötuen toimenpiteiden toteutuminen v. 1995. Suomen ympäristökeskus.
82. Leskelä, Ari & Hudd, Richard: Kyrönjoen lohivaikuttamisen ja meritaimenistutusten tuloksellisuus Carlin-merkin-
töjen perusteella. Länsi-Suomen ympäristökeskus.
83. Hudd, Richard; Kjellman, Jakob & Leskelä, Ari: Kyrönjoen suiston poikastuotanto ja kalakannat. Länsi-Suomen ympäristökeskus.
84. Markat ja maankäyttö. Kaavatalouden näkökohtia päättäjille. Ympäristöministeriö.
85. Uuskallio, Irma: National overview on distressed urban areas in Finland. Ympäristöministeriö.
86. Peltola, Taru: Yritysten muuttuva toimintaympäristö hallinnon haasteena. Hämeen ympäristökeskuk-
sen pk-yritysprojehtin loppuraportti. Hämeen ympäristökeskus.
87. Luostarinen, Matti; Yli-Viikari, Anja (toim.): Maaseudun kulttuurimaisemat. Suomen ympäristökes-
kus, Maatalouden tutkimuskeskus.
88. Airamo, Raimo & Permanto, Timo: Yleiskaavoitus ja vaikutusten arviointi. Esimerkkinä Lahden yleis-
kaavoitus 1946 - 1996. Ympäristöministeriö.
89. Seppälä, Jyri & Jouttijärvi, Timo (toim.): Metsäteollisuus ja ympäristö. Suomen ympäristökeskus.
90. Jokioisten kulttuuriympäristöohjelma. Ympäristöministeriö.
91. Kilpailuttaminen valtion tukemassa asuntotuotannossa. Työryhmän mietintö. Ympäristöministeriö.
92. Malaska, Pentti; Luukkanen, Jyrki; Vehmas, Jarmo & Kaivo-oja, Jari: Environment - Based Energy
Taxation in the Nordic Countries. Comparisons by Energy Source and a Review of the Finnish
Discussion. Ympäristöministeriö.
93. Muuttuva ihminen - muuttuva asunto. Ympäristöministeriö.
94. Jauhainen, Tapani; Vuorinen, Heikki; Heinonen-Guzejev, Marja & Paikkala, Sirkka-Liisa: Ympäristö-
melun vaikutukset. Ympäristöministeriö.
95. Lind, Tuula & Pietala, Jorma: Kotipalveluja käyttävien vanhusten kauppamatkat Lahdessa. Ympäris-
töministeriö.
96. The Finnish Background Report for the EC Documentation of Best Available Techniques for Pulp and
Paper Industry. Ympäristöministeriö.
97. Alanen, Tommi & Ratia, Pasi: Asuntorakentamisen työllisyysvaikutukset. Ympäristöministeriö.
98. Pitkäjärvi, Jyrki: Geenitekniikalla muunnettujen mikro-organismien ympäristövaikutukset. Suomen
ympäristökeskus.
99. Viinikainen, Tytti: Yhteiskuntatieteellinen ympäristötutkimus Suomessa. Katsaus tutkimusaloihin ja
kirjallisuuteen. Suomen ympäristökeskus.
100. Pietiläinen, Olli-Pekka & Pirinen, Marja: Typpi- ja fosforikuormituksen vaikutus perifytonon kas-
vuun Kymijoenlaaksoilla. Suomen ympäristökeskus.
101. Maataloudesta peräisin olevien nitraattien vesiin pääsyn rajoittamista koskeva valtioneuvoston pää-
tösehdotus. - Työryhmän mietintö. Ympäristöministeriö.
102. Suurmyymälätyöryhmän mietintö. Ympäristöministeriö.
103. Kilpi, Mikael & Asanti, Timo (toim.): Saaristolinnuston suojelun nykytila Suomen rannikoilla. Suo-
men ympäristökeskus.
104. Björklöf, Katarina: Merkkigeenien käyttö geeniteknisesti muunnettujen mikro-organismien seuran-
taan ympäristössä. Suomen ympäristökeskus.
105. Filatov & Heinonen: Results of the Finnish-Russian Joint Study of the Lakes Onega, Ladoga and
Saimaa Conducted in the Summer of 1990. Suomen ympäristökeskus.
106. Hukkanen, Tiina: Puutalo- ja -rakennusprojekti. Ympäristöministeriö.
107. Paldanius, Jari: Vuorovaikutteisen suunnittelun kokemuksia Suomessa. Ympäristöministeriö.
108. Biodiversiteettityöryhmä: Ympäristöministeriön toimintaohjelma luonnon monimuotoisuuden säi-
lyttämiseksi. Ympäristöministeriö.
109. Lahti, Pekka; Heinonen, Sirkka; Koski, Kimmo & Tolsa, Heimo: Kestävä kehitys aluerakenteessa. Kan-
sainvälisiä näkemyksiä, suomalainen sovellus. Ympäristöministeriö.
110. Water and Wastewater Management in Finland and Fifteen Other European Countries. Ympäristömi-
nisteriö.
111. Luontokoulutyöryhmä: Luontokoulutoiminta. Palvelut. Kehittämisideat. Verkostot. Ympäristömi-
nisteriö.
112. Sipilä, Kaija: Luonto- ja leirikoulutoiminta osana maaseudun kehittämistä. Ympäristöministeriö.
113. Itämeren tila. Ympäristöministeriö.
114. Siikanen, Antti: Kotitalous ja asumismenot. Selvitys lama-ajan asumismenoista. Ympäristöministeriö.
115. Äystö, Virpi: Rehevien järvien kunnostusten arviointi. Suomen ympäristökeskus.
116. Kleemola, Sirpa & Forsius, Martin: 6th Annual Report 1997. UN ECE Convention on Long-Range
Transboundary Air Pollution, International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air
Pollution Effects on Ecosystems. Suomen ympäristökeskus.
117. Marttunen, Mika & Kylmä, Petri: Kalakantojen hoitomalli Inarjärven kalastutusten vaikutusten
arvioinnissa. Suomen ympäristökeskus.

118. Viirikorpi, Paavo: Eteneekö lähiöuudistus? Paikallisten lähiöprojektien käynnistämismuutoksen arviointi. Ympäristöministeriö.
119. Mäkinen, Risto: Remonttiohjelma 1992 - 1996. – Korjausrakentamisen tutkimus- ja kehitysprojektien tulokset. Ympäristöministeriö.
120. Mähönen, Outi & Joki-Heiskala, Päivi: (toim.) AMAP-Arktisen ympäristön tila ja Suomen Lappi. Suomen ympäristökeskus.
121. Lehtoranta, Jouni: Ravinteet Itäisen Suomenlahden pintasedimentissä. Suomen ympäristökeskus.
122. Åkerblom, Satu: Erityisasuminen. Katsaus Ruotsin vanhusten asumiseen 1980- ja 1990-luvuilla. Ympäristöministeriö.
123. Seppälä, Jyri: Decision analysis as a tool for life cycle impact assessment. Suomen ympäristökeskus.
124. Lindholm, Tapio; Heikkilä, Raimo & Heikkilä, Marjo (eds.): Ecosystems, fauna and flora of the Finnish-Russian Nature Reserve Friendship. Suomen ympäristökeskus.
125. Malkki, Sirkka; Heinonen-Tanski, Helvi & Jantunen, Paula: Ympärikuutisten kompostikäymälöiden toimintavarmuus ja häiriöiden kartoitus. Ympäristöministeriö.
126. Peuhkuri, Timo: Ympäristövaikutusten arviointi energia-alan ohjelmavalmistelussa. Tapaustutkimus hallituksen energiansäästöohjelman valmisteluprosessista. Suomen ympäristökeskus.
127. Kankaanpään kulttuuriympäristöohjelma. Ympäristöministeriö.
128. Kananoja, Tapio: Turun ja Porin läänin kallioperän suojelu- ja opetuskohteita. Ympäristöministeriö.
129. Kaavoitustoimen seuranta 1996. Ympäristöministeriö.
130. Asumistuesta itselliseen asumiseen vai toimeentulotukeen? I-osaraportti. Ympäristöministeriö.
131. Melanen, Matti & Ekqvist, Marko (toim.): Suomen ilmanpäästöt ja niiden skenaariot (SIPS-projekti) Tietojärjestelmän tietopohja ja alustavia tuloksia. Suomen ympäristökeskus.
132. Nikulainen, Virpi & Pyy, Outi: Huoltoasemien maaperän kunnostus. Suomen ympäristökeskus.
133. Isaksson, Kaj: Korjausrakentaminen asunto-osa-alueissa ja aravavuokrataloissa. Ympäristöministeriö.
134. Larjavaara, Ilmari: Asuntojen yksityistäminen Pietarissa. Ympäristöministeriö.
135. Liukkonen, Matti: Asukkaat asumisoikeusasuntojen suunnittelussa. Ympäristöministeriö.
136. Koski, Kimmo & Lahti, Pekka: Kaupan suuryksiköt ja kunnallistalous – Herkkyysanalyysi. Ympäristöministeriö.
137. Suomen biologista monimuotoisuutta koskeva kansallinen toimintaohjelma 1997 - 2005. Ympäristöministeriö.
138. Karvinen, Päivi: Kansalaisten kokemuksia YVA-menettelyyn osallistumisesta. Ympäristöministeriö.
139. Kiviniemi, Markku & Sulankivi, Kristiina: Talonrakentamisen ja kiinteistönhoidon laatu- ja järjestelmien tilanneselvitys. Ympäristöministeriö.
140. Seppälä, Timo: Torjunta-aineiden käyttäytyminen Suomen ympäristöolosuhteissa. Suomen ympäristökeskus.
141. Mujunen, Satu-Pia; Teppola, Pekka & Minkkinen, Pentti: Metsäteollisuuden aktiivilietelaitosten toiminnan monimuuttujainen seuranta ja mallintaminen. Kaakkois-Suomen ympäristökeskus.
142. Teollisuuslaitoksen ympäristömelu. Ympäristöministeriö.
143. Ilmansuojelun neuvottelukunta: Ilmansuojelututkimuksen kehittämisohjelma 2001. Ympäristöministeriö.
144. Hudd, Richard & Kälax, Pia: 0+ kalanpoikasten esiintyminen ja 0+ kalanpoikasten esiintymisbiotoopit Kyrönjoen alaosalla. Länsi-Suomen ympäristökeskus.
145. Rautio, Mika: Ympäristönsuojelun hallinnollis-oikeudellinen ohjaus kemiallisen metsäteollisuuden vesiensuojelussa. Suomen ympäristökeskus.
146. Kulttuuriympäristön hoito-ohjelma 1997-98. Etelä-Savo ja Häme. Etelä-Savon ympäristökeskus.
147. Koskiaho, Kristiina (toim.): Eheyttävän suunnittelun haasteet. Neuvottelupäivät ympäristöministeriössä 1997. Ympäristöministeriö.
148. Vehmas, Jarmo; Malaska, Pentti; Luukkanen, Jyrki & Kaivo-oja, Jari: Ympäristöpoliittiset ohjauskeinot uusiutuvien energialähteiden käytön edistämiseksi. Ympäristöministeriö.
149. OECD arvioi maamme ympäristöpolitiikkaa. Yhteenveto arvioinnin päätelmistä ja suosituksista. Ympäristöministeriö.
150. Environmental Policies in Finland. Background papers for the OECD Environmental Performance Review of Finland 1997. Ympäristöministeriö.
151. Tanskanen, Juha-Heikki: Valtakunnallisten yhdyskuntajätteen hyödyntämistavoitteiden saavutettavuus Päijät-Hämeessä. Suomen ympäristökeskus.
152. Vanhojen metsien suojelutyöryhmä: Vanhojen metsien suojelu Pohjois-Suomessa. Vanhojen metsien suojelutyöryhmän osamietintö III, osa II karttaliitteet. Ympäristöministeriö.
153. Riihimäki, Juha & Hellsten, Seppo: Konnivesi-Ruotsalaisen säännöstelyn vaikutukset rantavyöhykkeessä. Suomen ympäristökeskus.
154. Natura 2000 -ehdotuksesta annetut lausunnot. Yhteenvetot ministeriöille, asiantuntijatahojen sekä järjestöjen ja edunvalvontatahojen lausunnoista. Ympäristöministeriö.
155. Kokko, Kai: Ympäristövaikutusten selvittäminen seutu- ja yleiskaavoituksessa – oikeudellisesta näkökulmasta. Ympäristöministeriö.
156. Räihä, Ulla: Alavuden kulttuuriympäristön hoito. Ympäristöministeriö.
157. Rönkä, Kimmo; Halomo, Jyrki; Huhdanmäki, Aimo; Teerimo, Seppo; Terho, Juha & Tolsa, Heimo: Hissi vanhaan kerrostaloon. Taloudellinen kannattavuus, sosiaalinen tarpeellisuus sekä hallinnolliset ja taloudelliset edellytykset. Ympäristöministeriö.
158. Leskelä, Ari; Hudd, Richard; Kälax, Pia & Kjellman, Jakob: Kevätkutuisten kalalajien lisääntyminen Lappsundinjoella 1990–96. Länsi-Suomen ympäristökeskus.
159. Hyvärinen, Marketta: Ympäristövaikutusten arvioinnin kehittäminen metsätalouteen liittyvässä suunnittelussa – esimerkkisuunnittelujen tarkastelu. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus.
160. Marttunen, Mika: Vaihdohteiden kuormitustavoitteiden vaikutukset sisävesissä. Suomen ympäristökeskus.

161. Melanen, Matti (toim.): Jätealan tutkimuksen puiteohjelma 1998–2002. Suomen ympäristökeskus.
162. Ympäristön seurannan strategia. Ympäristöministeriö.
163. Tamminen, Pertti; Pakarinen, Kimmo; Lintilä, Janne & Salmela, Arto: Kunnan nettotulot kerrostalo-, rivitalo- ja omakotialueilla. Tutkimuskohteena Tampere. Ympäristöministeriö.
164. Saarikoski, Heli: Ympäristövaikutusten arviointi jätehuollon strategisessa suunnittelussa. Suomen ympäristökeskus.
165. Andersson, Harri: Lounais-Suomen saaristo - valtakunnallisen alueidenkäyttötavoitteiden näkökulmasta. Ympäristöministeriö.
166. Andersson, Harri: Sydvästra Finlands skärgård - med tanke på de riksomfattande målen för markanvändning. Ympäristöministeriö.
167. Nippala, Eero; Nuuttila, Harri & Rintanen, Risto: Asuinrakennusten perusrakennustarpeen vaihtoehtoja 1996–2005. Ympäristöministeriö.
168. Wahlberg, Niklas & Aalto, Jari (toim.) Suomen uhanalaisia lajeja: tummaverkkoperhonen (*Melitaea diamina*). Suomen ympäristökeskus.
169. Kuussaari, Mikko; Pöyry, Juha; Savolainen, Markku & Paukkunen, Juho: Suomen uhanalaisia lajeja: lehtohopeatäplä (*Clossiana titania*). Suomen ympäristökeskus.
170. Lindström, Marianne (ed.): Water Legislation in Selected Countries - a Comparative Study for South African Water Law Review. Suomen ympäristökeskus.
171. Mäkinen, Risto: Rakentamisen vastuut ja laatu. Selvitysmiehen raportti. Ympäristöministeriö.
172. Nurmi, Paula: Eräiden Suomen järvien pohjaeläimistö. Valtakunnallisen seurannan tulokset 1989–1992. Suomen ympäristökeskus.
173. Haverinen, Kalervo & Lempinen, Petri: Omin avuin, valtion varoin. Opiskelija-asuntojärjestelmä Suomessa. Ympäristöministeriö.
174. Vaitomaa, Jaana: Sinilevien ja niiden tuottamien maksatoksiinien käyttäytyminen imeytyksessä. Ko-keita harju- ja sedimenttipatsailla. Suomen ympäristökeskus.
175. Porvari, Petri & Verta, Matti: Elohopea ja metyylielohopea tekoaltaissa ja Kemijoen vesistöissä. Suomen ympäristökeskus.
176. Hyvärinen, Veli (toim.) Hydrologinen vuosikirja 1994. Hydrological Yearbook 1994. Suomen ympäris-tökeskus.
177. Suomen tekemät kansainväliset ympäristösopimukset. Ympäristöministeriö.
178. Helin, Juha: Turvetuotantovelvoitteita koskevat vesituomioistuinten lupapäätökset. Suomen ympä-ristökeskus.
179. Soveri, Jouko; Peltonen, Kimmo & Järvinen, Olli: Laskeuma Helsinginseudulla lumesta määritettynä talvikaudella 1995–1996. Suomen ympäristökeskus.
180. Vesala, Riitta: Näkökulmia asemakaavaselostuksen uudistamiseen. Ympäristöministeriö.
181. Kujala-Räty, Katariina; Hiisvirta, Leena; Kaukonen, Marke; Liponkoski, Markku & Sipilä, Annika: Talousveden laatu Suomessa vuonna 1996. Suomen ympäristökeskus.
182. Rusanen, Pekka; Mikkola-Roos, Markku & Asanti, Timo: Merimetso *Phalacrocorax carbo* - Musta viikin-ki. Merimetson kannan kehitys ja siihen vaikuttavat tekijät Itämeren piirissä ja Euroopassa. Suomen ympäristökeskus.
183. Haukkasalo, Hannu: Kuntarakenne - yleiskaava Nurmijärvi. Ympäristöministeriö.
184. Ostamo, Eira & Hilden, Mikael: YVA-yhteysviranomaisten lausuntojen laatu - ympäristövaikutusten arviointimenettelyt 1994–1997. Ympäristöministeriö.
185. Lehtonen, Elina & Kangasjärvi, Jaakko: Biotekniikan riskit? Siirtogeenisten kasvien ympäristöriskit Suomen oloissa. Suomen ympäristökeskus.
186. Heikkilä, Mikko, Karppinen, Seppo & Santasalo, Tuomas: Parempi kaupunkikeskusta - seitsemän kaupunkikeskustan kehittäminen. Ympäristöministeriö.
187. Lankinen, Markku: Lähiöt muuttuvat ja erilaistuvat - 36 lähiön tilastollinen seuranta 1980–95. Ympä-ristöministeriö.
188. Räike, Antti & Pietiläinen, Olli-Pekka: Typpikuormituksen vaikutus Lohjanjärven ja sen alapuolisen vesialueen tilaan. Suomen ympäristökeskus.
189. Pietiläinen, Olli-Pekka & Niinioja, Riitta: Typpi ja fosfori Pyhäselän rehevöitymisen säätelijöinä. Suo-men ympäristökeskus.
190. Jauho, Mikko & Allt, Anu: Kokemuksia laitosten muuttamisesta asuinkäyttöön. Ympäristöministeriö.
191. Mustonen, Tuija: Mäntyharjun kulttuuriympäristön hoito-ohjelma. Etelä-Savon ympäristökeskus.
192. Kylä-Setälä Annamajja: Maaperänsuojelun toteutuminen alueellisella tasolla - esimerkkinä Satakun-ta. Suomen ympäristökeskus.
193. Lonka Harriet: Öljy- ja kemikaalivahinkojen torjuntavalmius Suomessa - ympäristövahinkojen tor-junnan näkökulma. Suomen ympäristökeskus.
194. Niemi, M.; Kulmala, A.; Vanhala, P.; Kulokoski, V. & Esala, M.: Orgaanisten jäteaineiden vaikutukset maaperän mikrobistoon ja kasvien typensaantiin. Suomen ympäristökeskus.



YMPÄRISTÖN- SUOJELU

Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutukset

Suomessa on 1990-luvulla sellun valmistuksessa siirrytty perinteisestä kloorivalkaisusta happivalkaisuun (TCF, Total Chlorine Free) ja klooridioksidivalkaisuun (ECF, Elementary Chlorine Free). Valkaisujätevesien kemiallisia ominaisuuksia ja biologisia vaikutuksia toksisuustestein ja malliekosysteemikokein on tutkittu projektissa "Happikemikaalien käyttöön perustuvan massanvalkaisun ympäristövaikutuksia". Projekti on toteutettu kaksivaiheisena vuosina 1993 - 1997 ja sen I vaiheessa, jonka tuloksista on ilmestynyt useita julkaisuja, tutkittiin lehtipuumassan tuotannosta aiheutuvien valkaisu-jätevesien vaikutuksia. Vaiheessa II tutkittiin havupuumassan tuotannosta aiheutuvien valkaisu-jätevesien lisäksi aktiivilietelaitoksessa käsitellyn yhdyskuntajäteveden sekä luonnontilaisesta suosta peräisin olevan veden vaikutuksia.

Tämä julkaisu sisältää vaiheen II malliekosysteemitutkimusten ja kala-altistusten tulokset. Suoveden ja yhdyskuntajäteveden rehevöittävä vaikutus murtovesiympäristöä kuvaavissa malliekosysteemeissä oli selvästi valkaisu-jätevesiä suurempi. Valkaisu-jätevesien vaikutusmekanismi on enemmänkin kemiallinen, joka ilmenee esim. orgaanisen aineksen vähäisempänä sitoutumisena sedimenttiin. Kalayksilöissä ECF- ja TCF-valkaisu-jätevesien aiheuttamat vasteet olivat samanlaisia. Suoveden ja yhdyskuntajäteveden todettiin aiheuttavan vähintään yhtä suuria vasteita kuin valkaisu-jätevesien.

ISBN 952-11-0262-4

ISSN 1238-7312

Myynti: Suomen ympäristökeskuksen asiakaspalvelu
sähköpostiosoite: neuvonta.syke@vyh.fi
faksi (09) 4030 0190, puh. (09) 4030 0100
postiosoite: PL 140, 00251 Helsinki
ja Oy Edita Ab

Oy EDITA Ab
PL 800, 00043 EDITA, vaihde (09) 566 01
ASIAKASPALVELU
puh. (09) 566 0266, telefax (09) 566 0380
EDITA-KIRJAKAUPAT HELSINGISSÄ
Annankatu 44, puh. (09) 566 0566
Eteläesplanadi 4, puh. (09) 662 801



9 789521 102622